



ТРАКТОРЫ И СЕЛЬХОЗМАШИНЫ

НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Каминский В.Н.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР

Лепёшкин А.В.

Издается с февраля 1930 г.

6•2018

Выходит 6 раз в год

ISSN 0321-4443

DOI: 10.31992/0321-4443-2018-6

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Годжаев З.А.

Городецкий К.И.

Ерохин М.Н.

Жалнин Э.В.

Измайлов А.Ю.

Ковалёв М.М.

Котиев Г.О.

Ксенович Т.И.

Кутьков Г.М.

Лачуга Ю.Ф.

Ляшенко М.В.

Предигер В.

Фомин В.М.

Щельцын Н.А.

Учредитель

- Редакция

Зарегистрирован Федеральной службой
по надзору в сфере связи, информационных
технологий и массовых коммуникаций 18.03.2016
ПИ № ФС77-65085

Журнал входит в перечень ВАК РФ
изданий для публикации трудов соискателей
ученых степеней, а также в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ)

Издатель

Московский Политех

Адрес редакции:

115280, Москва, Автозаводская, 16
Тел. (495) 276-33-67
E-mail: izdat.mospolytech@yandex.ru
Сайт: www.mospolytech.ru

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
И ОБОРУДОВАНИЕENVIRONMENTALLY CLEAN TECHNOLOGIES
AND EQUIPMENT

**Бондарь В.Н., Малоземов А.А., Кукис В.С.,
Омельченко Е.А., Малоземов Г.А.**
Математическое моделирование химической кинетики
процессов воспламенения топлива в камере сгорания
дизеля на режимах пуска

**Bondar' V.N., Malozyomov A.A., Kukis V.S.,
Omel'chenko E.A., Malozyomov G.A.**
Mathematical modeling of the chemical kinetics
of the processes of fuel ignition in the combustion
chamber of a diesel engine on start modes

3

НОВЫЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

NEW MACHINES AND EQUIPMENT

Шишин Д.А.
Влияние конструкции очесывающего устройства
на характеристики воздушного потока в камере
очеса льнокомбайна

Shishin D.A.
Influence of the deseeding device design
on the air flow characteristics in the combing chamber
of the flax harvester

12

**Седашкин А.Н., Милюшина Е.А., Костригин А.А.,
Драгунов А.В.**
Агрегат для внесения пылящихся известковых удобрений

**Sedashkin A.N., Milyushina E.A., Kostrigin A.A.,
Dragunov A.V.**
The unit for making dusty lime fertilizers

17

Мяленко В.И.
Дифференцированное распределение упрочняющих
материалов на режущих лезвиях грунтообрабатывающих
машин

Myalenko V.I.
Differential distribution of hardening materials
on cutting blades of soil processing machines

22

Титов Н.В.
Повышение долговечности рабочих органов
почвообрабатывающих машин путем нанесения
металлокерамических покрытий

Titov N.V.
Increase of durability of working bodies of tillage
machines by applying metal-ceramic coatings

27

ТЕОРИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЯ

THEORY, DESIGN, TESTING

Пархоменко Г.Г.
Принципы разработки технологического процесса обработки
почвы в засушливых условиях юга России

Parhomenko G.G.
Principles of development of the technological process
of tillage in arid conditions of the south of Russia

32

**Бычков И.Е., Купреенко А.И., Бычкова Т.В.,
Исаев Х.М.**
Обоснование ширины высыпного отверстия шнекового
транспортера-распределителя

**Bychkov I.E., Kupreenko A.I., Bychkova T.V.,
Isaev H.M.**
Justification of the width of the outlet of the screw
conveyor and distributor

40

Кузнецов А.Н., Поливаев О.И., Лощенко А.В.
Визуализация результатов математического моделирования
динамических процессов в мобильных энергетических
средствах

Kuznecov A.N., Polivaev O.I., Loshchenko A.V.
Visualization of the results of mathematical modeling
of dynamic processes in mobile power facilities

45

**Ляшенко М.В., Поздеев А.В., Чумаков Д.А.,
Искалиев А.И.**
Определение передаточной функции пневматической
подвески сиденья на стенде-гидропульсаторе

**Lyashenko M.V., Pozdeev A.V., Chumakov D.A.,
Iskaliev A.I.**
Determination of the transfer function of the pneumatic
suspension of the seat on the hydraulic pulsator stand

53

КАЧЕСТВО, НАДЕЖНОСТЬ

QUALITY, RELIABILITY

Гордеев О.В., Гордеев В.О.
Усовершенствованный рабочий орган для рыхления почвы
в рядах ягодных культур

Gordeev O.V., Gordeev V.O.
Improved working tool for loosening the soil
in the rows of berry crops

58

**Петрищев Н.А., Лавров А.В., Крюковская Н.С.,
Капусткин А.О., Саяпин А.С., Поспелов А.П.,
Прядкин В.И.**
Контроль качества силовых передач и ходовых систем
с использованием цифровых технологий

**Petrishchev N.A., Lavrov A.V., Kryukovskaya N.S.,
Kapustkin A.O., Sayapin A.S., Pospelov A.P.,
Pryadkin V.I.**
Quality control of power transmissions
and undercarriage systems using digital technology

63

ЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ
И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВАECONOMICS, ORGANIZATION
AND TECHNOLOGY OF MANUFACTURING

**Алатырев С.С., Кручинкина И.С., Алатырев А.С.,
Федоров Д.И.**
Обоснование потребного количества транспортных средств
при комбайновой уборке капусты

**Alatyrev S.S., Cruchinkina I.S., Alatyrev A.S.,
Fedorov D.I.**
Justification of required number
of vehicles when combined cabbage cleaning

70

Бурьянов А.И., Горячев Ю.О., Червяков И.В.
Обоснование составов машинно-тракторного парка
и их эффективности на базе универсальных мобильных
энергосредств для основных регионов юга России

Bur'yanov A.I., Goryachev YU.O., Chervyakov I.V.
Substantiation of machine and tractor fleet compositions
and their efficiency on the basis of universal mobile power
facilities for the main regions of the South of Russia

77

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении по каталогу
«Пресса России» – индекс 27863, а также в агентствах: «Информнаука», тел. (495) 787-38-73, gladkih@viniti.ru;
«Урал-Пресс», тел. (495) 789-86-36, e_timoshenkova@ural-press.ru;
«МК-Периодика», тел. (495) 672-70-89, chernous@periodicals.ru

Перепечатка материалов из журнала возможна при обязательном письменном согласии редакции.
При перепечатке ссылка на журнал «Тракторы и сельхозмашины» обязательна.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

За приводимые в статьях факты, точность расчетов и экспериментальных данных,
а также за точность цитирования и ссылок на источники ответственность несут авторы.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССОВ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ТОПЛИВА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЯ НА РЕЖИМАХ ПУСКА

MATHEMATICAL MODELING OF THE CHEMICAL KINETICS OF THE PROCESSES OF FUEL IGNITION IN THE COMBUSTION CHAMBER OF A DIESEL ENGINE ON START MODES

В.Н. БОНДАРЬ¹, к.т.н.
А.А. МАЛОЗЕМОВ¹, д.т.н.
В.С. КУКИС¹, д.т.н.
Е.А. ОМЕЛЬЧЕНКО², к.т.н.
Г.А. МАЛОЗЕМОВ¹

¹ Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет), Челябинск, Россия

² Омский филиал Военной академии материально-технического обеспечения им. генерала армии А.В. Хрулева, Омск, Россия, idem74@mail.ru

V.N. BONDAR¹, PhD in Engineering
A.A. MALOZYOMOV¹, DSc in Engineering
V.S. KUKIS¹, DSc in Engineering
E.A. OMEL'CHENKO², PhD in Engineering
G.A. MALOZYOMOV¹

¹ South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

² Omsk branch of the Military Academy of logistics n.a. general Andrey V. Khrulyov, Omsk, Russia, idem74@mail.ru

В статье представлены результаты расчетно-теоретического исследования, направленного на обеспечение соответствия дизелей требованиям нормативно-технических документов к пусковым качествам. В ходе исследования создана и реализована в виде отдельного программного обеспечения математическая модель химической кинетики процессов воспламенения и горения топлива в камере сгорания, которая может быть использована при прогнозировании пусковых качеств дизеля. Разработанная математическая модель имплементирована в трехмерную газодинамическую модель процессов в камере сгорания. В ходе расчетного исследования химической кинетики реакций горения топлива на режимах пуска дизеля установлено, что для обеспечения воспламенения топлива в камере сгорания необходимая величина локальных температур рабочего тела должна составлять не менее 1350 К. Допустимая доля оксида углерода в рабочем теле на режиме сопровождения подогревателем воздуха на впуске не должна превышать 40 %. Показано, что увеличение степени сжатия при постоянной температуре газов мало влияет на химическую кинетику предпламенных процессов и скорость реакции горения. Выявлено, что температура стенок камеры сгорания имеет преобладающее влияние на возможность воспламенения топлива. Установлены значения температур стенок, до которых необходимо разогреть дизель с применением средств предпусковой подготовки и облегчения пуска для различных температур среды, частот вращения коленчатого вала, степени сжатия, концентрации продуктов сгорания подогревателя воздуха на впуске. Разработанные математическая модель и программное обеспечение используются в текущих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах Южно-Уральского государственного университета по созданию новых и модернизации существующих дизелей ООО «ЧТЗ – Уралтрак» различных типов.

Ключевые слова: дизель, пуск, рабочие процессы, химическая кинетика, газовая динамика, воспламенение топлива, горение, математическая модель, программное обеспечение.

The article presents results of calculation and theoretical research, aimed at ensuring the compliance of diesel engines with the requirements of regulatory technical documents for starting characteristics. In course of the study, the mathematical model of chemical kinetics, ignition processes and fuel combustion in the combustion chamber was developed. Model can be used for predicting diesel engine starting characteristics. Model was realized as separate software. The developed mathematical model is implemented in the three-dimensional gas-dynamic model of processes in combustion chamber. In the course of the fuel combustion reactions chemical kinetics computational studies on diesel start-up modes, it was determined, that to ensure ignition of fuel in combustion chamber, required gases local temperature should be at least 1350 K. The permissible proportion of carbon oxide in the gases, produced by intake air heater, should not exceed 40 %. It is shown, that increase of compression ration, at a constant gas temperature, has little effect on the chemical kinetics of pre-flame processes and combustion reaction rate. It is revealed, that temperature of the combustion chamber walls has a prevailing effect on the possibility of fuel ignition. The wall temperatures have been determined, to which it is necessary to heat the diesel engine using pre-start heating and start facilitate tools for various environmental temperatures, crankshaft rotational speeds, compression ratios and concentration of the intake air heater combustion products. The developed mathematical model and software are used in current research and development work of the South Ural State University to create new and modernize existing diesel engines of various types, produced by Chelyabinsk tractor plant.

Keywords: diesel engine, start-up, working processes, chemical kinetics, gas dynamics, fuel ignition, combustion, mathematical model, software.

Введение

Одной из основных характеристик поршневых двигателей внутреннего сгорания (ПДВС) является возможность пуска в любых условиях, предусмотренных конструкторской и эксплуатационной документацией. Если ПДВС не запустится, машина, на которой он установлен, полностью потеряет возможность функционирования. Поэтому обеспечение гарантированного пуска двигателей является одной из основных задач, стоящих перед разработчиками, при создании новых и модернизации существующих моделей ПДВС. Одна из составляющих этой задачи – проведение расчетных исследований с целью прогнозирования влияния тех или иных изменений в конструкции двигателя на его пусковые качества. Общепринято считать, что пуск возможен, если величина суммарного крутящего момента, включающего крутящий момент стартера, момент, создаваемый давлением газов (в том числе, пусковым воздухом) в камере сгорания (КС) и момент трения в механизмах и агрегатах ПДВС, является положительной величиной [1]. Если в КС отсутствует горение топлива, то пуск становится невозможным. Определение закона тепловыделения на режимах пуска с использованием традиционных математических моделей, например, Н.Ф. Разлейцева [2] или Н. Hiroyasu и др. [3] невозможно, так как они не учитывают пространственное распределение параметров состояния рабочего тела в КС, наличие средств облегчения пуска и очень упрощенно описывают химическую кинетику окисления топлива. Целью исследования, результаты которого представлены в настоящей статье, являлась разработка математической модели химической кинетики процессов воспламенения топлива в КС дизеля на режимах пуска и ее имплементация (внедрение) в трехмерную газодинамическую модель процессов в КС, реализованную с применением методов вычислительной газовой динамики (CFD).

Математическая модель химической кинетики окисления дизельного топлива

Для расчета химической кинетики предпламенных процессов и горения дизельного топлива был использован кинетический механизм, разработанный Центром исследования двигателей Висконсинского университета в Мэдисоне (Engine Research Center University of Wisconsin-Madison, США) [4], основанный

на уравнениях окисления нормального гептана (29 реагентов и 52 реакции) и системе уравнений Аррениуса для каждой реакции [5]:

$$k_f = A \cdot T^b \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T}\right), \quad (1)$$

где k_f – коэффициент скорости реакции; A – предэкспоненциальный коэффициент; b – показатель степени; E_a – энергия активации; T – температура.

Схема кинетического механизма здесь не приводится из-за ее громоздкости, с ней можно ознакомиться в отечественной литературе [6]. Начальные концентрации реагентов устанавливаются исходя из реальных концентраций топлива и воздуха в КС, с учетом наличия продуктов сгорания подогревателя воздуха на впуске. Скорость реакции (скорость изменения концентрации реагентов) определяется по уравнению:

$$\frac{dC_{12}}{dt} = -k_f \cdot C_1^c \cdot C_2^d, \quad (2)$$

где c, d – показатели степени; C – концентрация реагента.

Для определения термодинамических свойств реагентов используются полиномы NASA [5, 7, 8]:

$$\frac{c_p}{R} = a_1 + a_2 \cdot T + a_3 \cdot T^2 + a_4 \cdot T^3 + a_5 \cdot T^4, \quad (3)$$

$$\frac{H}{R \cdot T} = a_1 + a_2 \frac{T}{2} + a_3 \frac{T^2}{3} + a_4 \frac{T^3}{4} + a_5 \frac{T^4}{5} + \frac{a_6}{T}, \quad (4)$$

$$\frac{S}{R} = a_1 \cdot \ln(T) + a_2 \cdot T + a_3 \frac{T^2}{2} + a_4 \frac{T^3}{3} + a_5 \frac{T^4}{4} + a_7, \quad (5)$$

где c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; R – индивидуальная газовая постоянная; H – энтальпия; S – энтропия; $a_1 \dots a_7$ – коэффициенты полиномов.

Так как коэффициенты полиномов зависят от температурного диапазона, при изменении температуры газовой смеси происходит переход от одного диапазона к другому, что влечет нелинейное (скачкообразное) изменение скорости реакции и нестабильность либо ошибку расчета. Для устранения этого недостатка была выполнена корректировка некоторых коэффициентов полиномов, которая не повлияла на достоверность расчета.

Система дифференциальных уравнений вида (2) относится к типу сверхжестких, по-

этому для ее решения использование традиционных численных методов (Эйлера, Рунге – Кутта, Адамса – Башфорта и т.д. [9]) является нецелесообразным, т.к. требует существенного (на несколько порядков) уменьшения расчетного шага и ведет к неприемлемому увеличению трудоемкости вычислительного эксперимента. Поэтому был использован решатель DASSL (differential / algebraic system solver) [10].

Для обеспечения возможности оценки влияния различных факторов на химическую кинетику воспламенения и горения дизельного топлива было создано программное обеспечение (ПО), которое реализует описанную выше математическую модель [11], представляющее собой программный класс на языке Modelica [12]. На рис. 1 показано окно графического редактора с результатами расчета, выполненного с применением разработанного класса. Необходимо отметить, что на рисунке 1 показано 29 реагентов, однако концентрация большинства промежуточных реагентов намного меньше масштаба графика.

Для расчета пространственно распределенных параметров состояния рабочего тела в КС математическая модель химической кинетики был имплементирована в код свободно распространяемого ПО OpenFOAM [14], в котором реализованы CFD-методы в трехмерной постановке. Для расчета процессов в КС на режимах пуска, были задействованы подмодели:

- турбулентного течения реагирующего газа – RANS и k-ε модель [15];
- распада струи: первичного – LISA, вторичного – KHRT [16];
- взаимодействия капель топлива в струе – O'Rourke [17];
- физических процессов при горении топлива – PaSR [18];
- взаимодействия капли топлива и стенки – Bai и Gosman [19].

Детальное описание математических моделей из-за большого объема не приводится, более подробная информация дана в работе А.А. Малоземова [20]. Верификация модели проводилась путем сравнения результатов тестового расчета с экспериментальными данными и результатами расчета выполненного с применением широко используемого в отрасли ПО AVL FIRE. На рис. 2. показаны индикаторные диаграммы, а на рис. 3 – поле температуры газов в КС.

Результаты исследования химической кинетики горения топлива на режимах пуска

Расчетное исследование химической кинетики реакций горения топлива на режимах пуска дизеля проводилось для оценки влияния различных факторов на химические процессы в КС и определения условий воспламенения дизельного топлива. Исходные данные, ис-

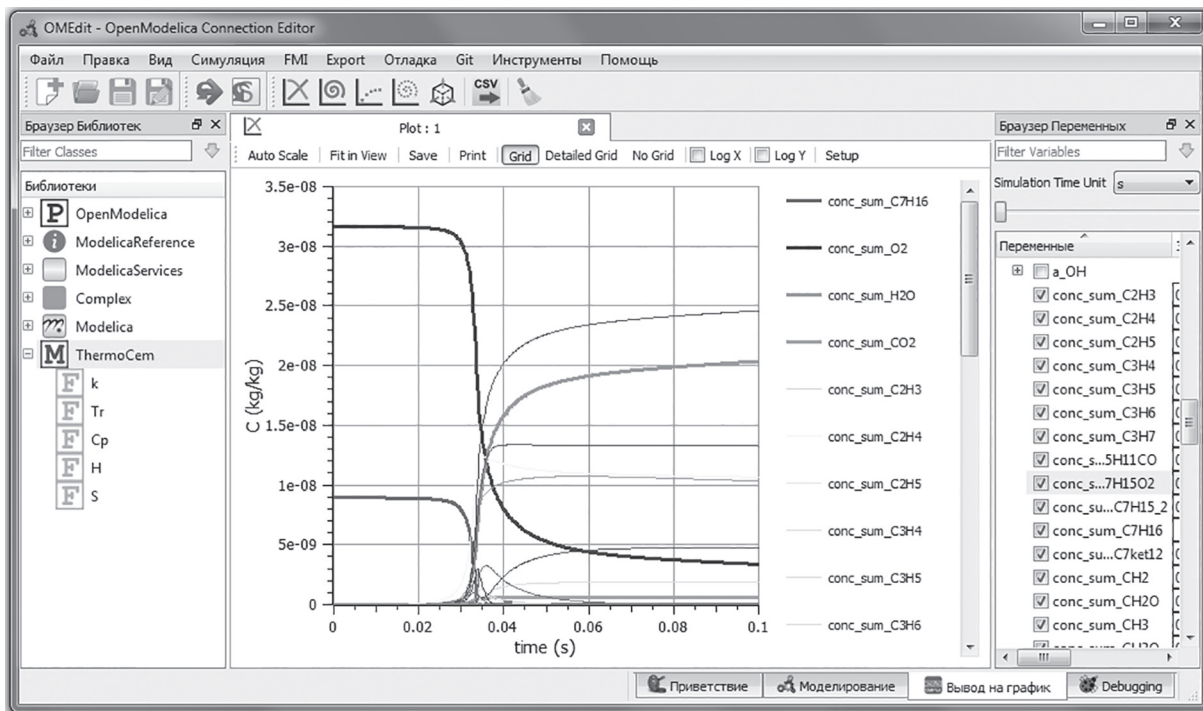


Рис. 1. Окно редактора OMEdit [13] с результатами расчета концентрации реагентов, образующихся при горении дизельного топлива

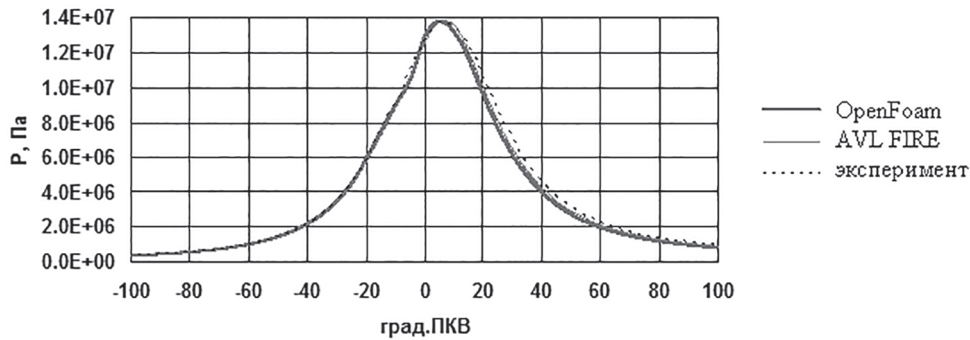


Рис. 2. Сравнение расчетных индикаторных диаграмм давления газов в КС дизеля 12ЧН13/15 на режиме максимальной мощности

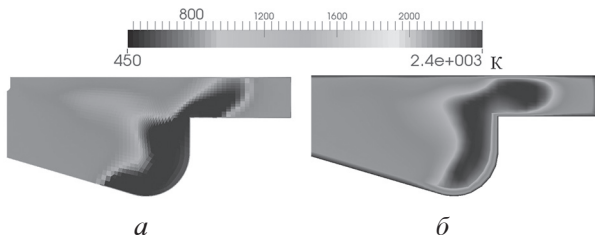


Рис. 3. Сравнение расчетной температуры газов в КС дизеля 12ЧН13/15 на режиме максимальной мощности: а) AVL FIRE; б) OpenFOAM

пользованные при расчете, соответствовали дизелю ООО «ЧТЗ – Уралтрак» с диаметром цилиндра 150 мм.

На рис. 4 показано изменение концентрации нормального гептана (*n*-гептана) при различных постоянных температурах газа в КС, а на рис. 5 – зависимость времени достижения концентрации *n*-гептана величины $1,2 \cdot 10^{-8}$ моль/см³ (величина выбрана условно, примерно соответствует 7 % вступившего в реакцию топлива, что может свидетельствовать о видимом начале реакции горения) от температуры газа в КС. Из рисунков видно, что скорость реакции существенно увеличивается с ростом температуры, при этом выбранная доля топлива 7 % вступает в реакцию за 0,02 с (что соответствует 24 град. поворота коленчатого вала (ПКВ)) при локальной температуре газов 1315 К.

Очевидный максимум скорости реакции имеет место при локальной температуре газов 1350...1400 К в момент времени 0,02 с, то есть через 10 град ПКВ после верхней мертвой точки (ВМТ), при угле начала впрыска 14 град ПКВ до ВМТ (рис. 6). Для уточнения условий воспламенения топлива выполнен расчет химической кинетики при линейно увеличивающейся температуре газов в КС (рис. 7). Начало видимого изменения скорости изменения концентрации реагентов наблюдается также при температуре 1350...1400 К.

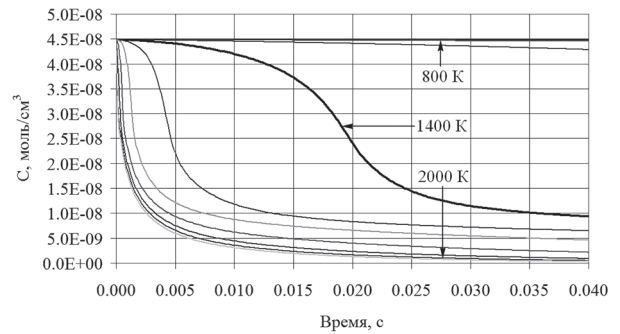


Рис. 4. Изменение концентрации *n*-гептана при различных (шаг – 100 К) температурах газа в КС (поршень в ВМТ, $\epsilon = 12,5$, $n = 200$ мин⁻¹)

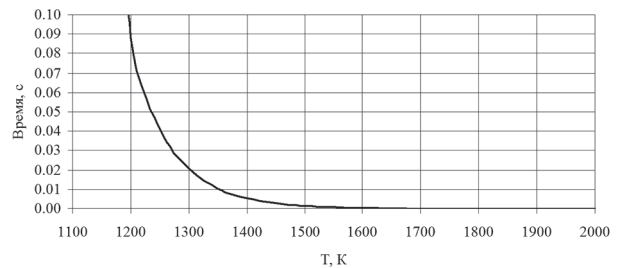


Рис. 5. Зависимость времени достижения концентрации *n*-гептана величины $1,2 \cdot 10^{-8}$ моль/см³ от температуры газа в КС

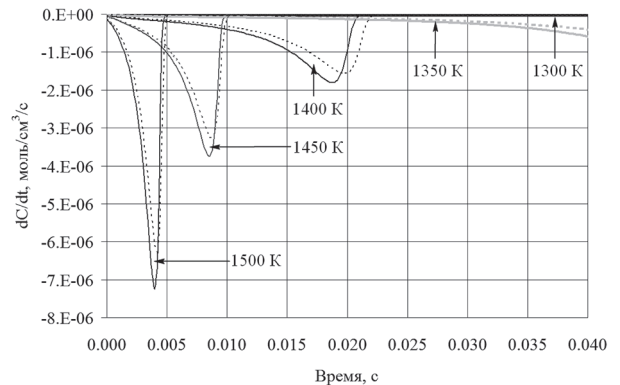


Рис. 6. Скорость изменение концентрации реагентов при различных температурах газа в КС (поршень в ВМТ, $\epsilon = 12,5$, $n = 200$ мин⁻¹): — — *n*-гептан; — кислород

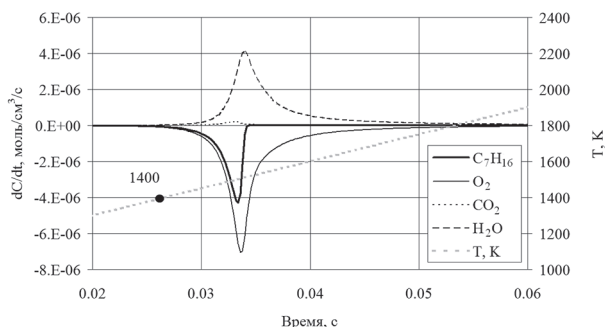


Рис. 7. Скорость изменение концентрации реагентов при линейно растущей температуре газа в КС (поршень в ВМТ, $\epsilon = 12,5$, $n = 200$ мин⁻¹)

На рис. 8 показано изменение концентрации реагентов при различной начальной массовой доле оксида углерода в КС, что иллюстрирует химическую кинетику реакции окисления топлива на режиме сопровождения подогревателем воздуха на впуске. Из рисунка видно, что увеличение массовой концентрации CO_2 свыше 40 % приводит к неполному сгоранию топлива. При меньших долях оксида углерода его влияние на скорость реакции нельзя назвать существенным.

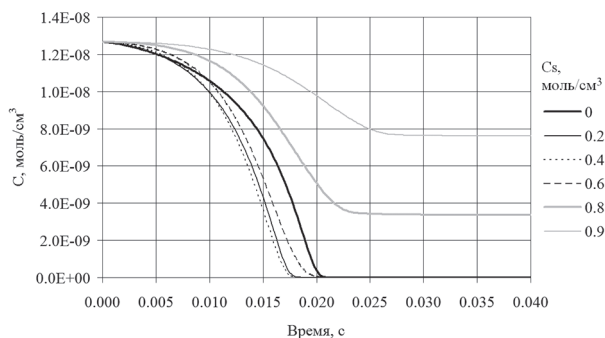


Рис. 8. Изменение концентрации *n*-гептана при различной начальной массовой доле CO_2 (C_s) в КС (поршень в ВМТ, $\epsilon = 12,5$, $n = 200$ мин⁻¹)

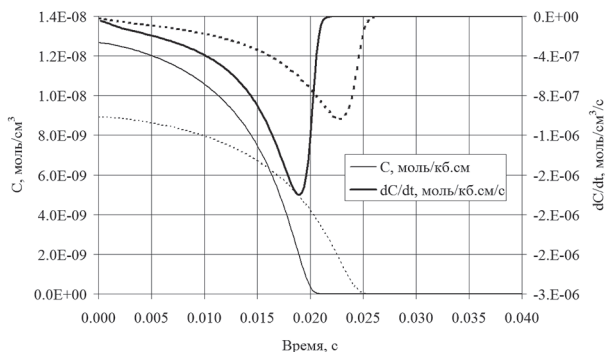


Рис. 9. Изменение концентрации *n*-гептана ($\epsilon = 12,5$, $n = 200$ мин⁻¹) при:
 — — постоянном объеме КС;
 — переменном объеме КС

Предыдущие расчеты выполнялись при постоянном объеме КС исходя из предположения, что при малых частотах вращения на пусковых режимах основная реакция происходит вблизи ВМТ и изменение объема, в рамках решения задач настоящего расчетно-теоретического исследования, можно не учитывать. Для оценки обоснованности данного предположения и вносимой погрешности выполнен расчет изменения концентрации *n*-гептана при постоянном и переменном объеме КС (рис. 9). Из рисунка видно, что, несмотря на почти двукратное различие в скорости реакции, продолжительность видимого горения при переменном объеме КС увеличилась с 24 до 28 град ПКВ (на 17 %).

Результаты исследования химической кинетики горения топлива на режимах пуска с применением CFD-модели

Рабочие процессы в КС дизеля на режимах пуска существенно отличаются от процессов на номинальных режимах. Замедляется скорость предпламенных процессов, на номинальном режиме видимое горение начинается примерно через 0,7...1 мс после начала впрыскивания, на режиме пуска (температура стенки КС $T_w = 423$ К) – примерно через 11...15 мс, т.е. период задержки воспламенения увеличивается в 15...20 раз. При $T_w = 323$ К видимого горения не наблюдается совсем, хотя реакция окисления топлива начинается.

Другой особенностью режима пуска является существенная неравномерность распределения температур рабочего тела в объеме КС. Это проявляется как локальным охлаждением в областях испарения топливной струи, так и снижением средней температуры на величину до 30 °С, что отрицательно влияет на процесс самовоспламенения.

Тепловыделение в ходе реакции окисления топлива происходит также крайне неравномерно по объему КС (рис. 10) и по времени процесса. На рис. 11 приведены средние и максимальные локальные температуры газов в КС. Анализ рисунка 11 показывает, что, например, для $t_w = 100$ °С средняя температура газов вблизи ВМТ не превышает 1000 К и, согласно расчету химической кинетики, видимого горения не должно наблюдаться. Тем не менее, оно есть. Это объясняется тем, что локальные температуры газов превышают установленную в ходе ранее выполненного расчета границу воспламенения 1350 К и достигают 2400 К.

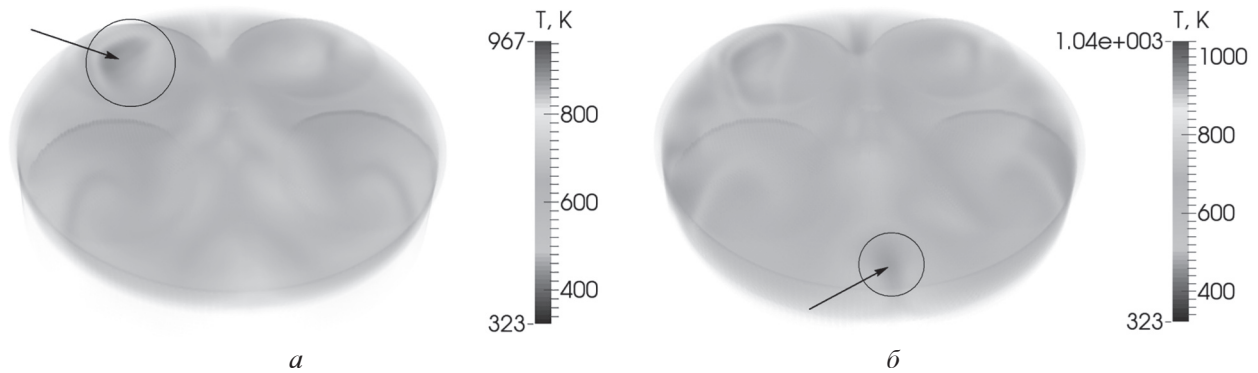


Рис. 10. Локальные очаги горения топлива:
а) 22 град ПКВ после ВМТ; б) 32 град ПКВ после ВМТ

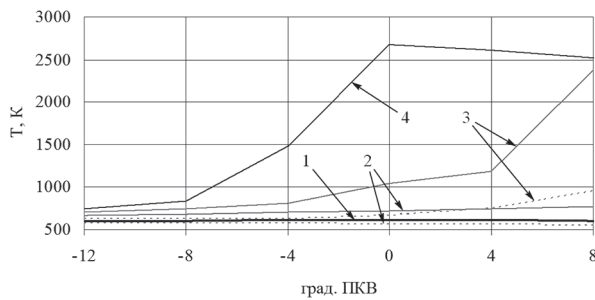


Рис. 11. Средние (.....) и максимальные локальные (—) температуры газов в КС:

1 – сжатие (без подачи топлива); 2 – $t_w = 50\text{ }^\circ\text{C}$;
3 – $t_w = 100\text{ }^\circ\text{C}$; 4 – $t_w = 150\text{ }^\circ\text{C}$

Вышеизложенное позволяет утверждать, что возможность воспламенения топлива на режимах пуска определяется не столько средними, сколько локальными температурами газа, которые, в свою очередь, зависят от газодинамических условий в КС. Максимальные локальные температуры составляют 2700 К и в условиях интенсивного горения достигаются вблизи ВМТ. Согласно теории цепных реакций Н.Н. Семенова [21], самовоспламенение топлива происходит, если скорость тепловыделения реакции превышает скорость теплоотвода. В нормальных условиях работы дизеля теплоотвод из зоны реакции определяется теплопередачей и работой сжатия или расширения газов. На режиме пуска, при низких частотах вращения, реакция протекает вблизи ВМТ и работа газов близка к нулю. Поэтому определяющими становятся процессы теплообмена, зависящие от перепада температур между стенками КС и зоной реакции, которая близка к стенкам. Данное утверждение подтверждается «виртуальным» экспериментом по расчету рабочего процесса дизеля с адиабатными граничными условиями на стенках КС. Как видно из рис. 12, при температуре среды $t_0 = -25\text{ }^\circ\text{C}$, когда при

нормальных условиях самовоспламенение невозможно, при отсутствии теплообмена наблюдается видимое горение.

При температуре среды $t_0 = 5\text{ }^\circ\text{C}$ граничной величиной температуры стенки, при которой происходит воспламенение топлива, можно считать $100\text{ }^\circ\text{C}$ (при $95\text{ }^\circ\text{C}$ и ниже видимого горения не наблюдается, рис. 13). Однако при $t_w = 100\text{ }^\circ\text{C}$ среднее индикаторное давление и, соответственно, работа цикла возрастают недостаточно для того, чтобы преодолеть момент сопротивления прокручиванию двигателя (рис. 14), и поэтому нельзя сказать, что пуск состоялся. Необходимо еще несколько циклов для дальнейшего прогрева стенок КС. В условиях $t_0 = -25\text{ }^\circ\text{C}$, при той же температуре стенки – $t_w = 100\text{ }^\circ\text{C}$ воспламенения на первом цикле не происходит.

На рис. 15 расчетом подтверждено положительное влияние увеличения степени сжатия на процесс самовоспламенения дизельного топлива. Необходимо отметить, что при $t_w = 50\text{ }^\circ\text{C}$ воспламенения топлива не происходит даже при степени сжатия 14,5 единиц, несмотря на то что температура сжатия совпадает с величиной, определенной для двигателя со степенью сжатия 12,5 и $t_w = 100\text{ }^\circ\text{C}$, что подтверждает предположение о том, что для обе-

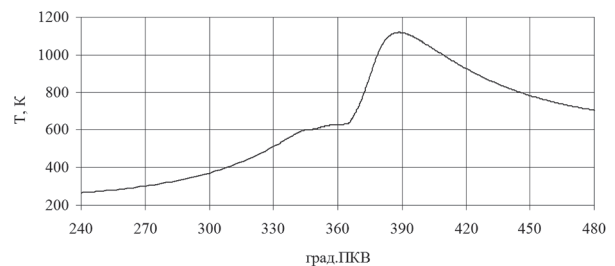


Рис. 12. Индикаторная температура газов в КС при адиабатных условиях на стенке КС ($t_0 = -25\text{ }^\circ\text{C}$)

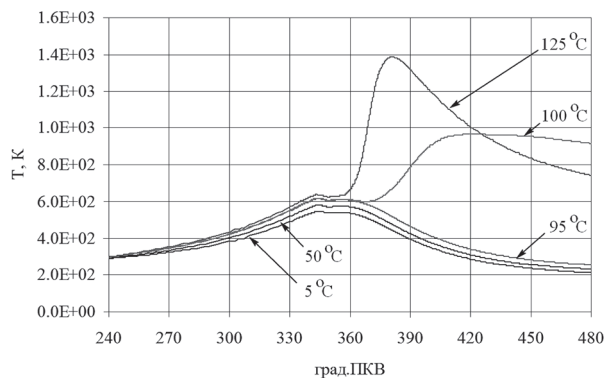


Рис. 13. Индикаторная температура газов в КС при различных температурах стенок ($t_0 = 5^\circ\text{C}$)

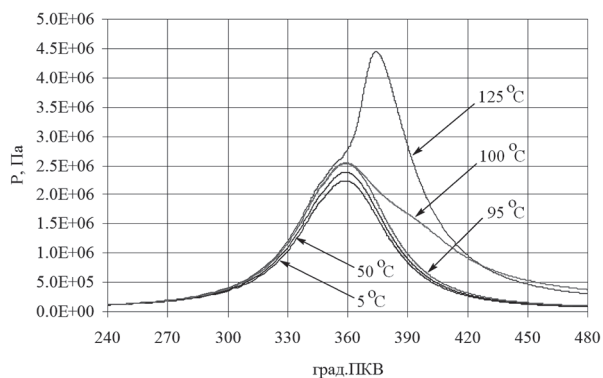


Рис. 14. Индикаторное давление газов в КС при различных температурах стенок ($t_0 = 5^\circ\text{C}$)

спечения устойчивого самовоспламенения топлива температура стенок имеет более важное значение, чем средняя температура рабочего тела.

На рис. 16 показано влияние начальной концентрации продуктов сгорания в КС на характеристику тепловыделения. Полученные данные подтверждают результаты расчетного исследования химической кинетики реакций горения топлива дизеля на режимах пуска, а именно то, что допустимая доля продуктов сгорания в рабочем теле на режиме сопровождения подогревателем воздуха на впуске может достигать 50 %. Однако, учитывая неравномерность концентрации CO_2 в объеме КС, для обеспечения гарантированного пуска желательно ограничить эту величину значением 40 %.

Выводы

Таким образом, в ходе исследования:

- создана и реализована в виде отдельного программного обеспечения математическая модель химической кинетики процессов воспламенения топлива в камере сгорания дизеля на режимах пуска;

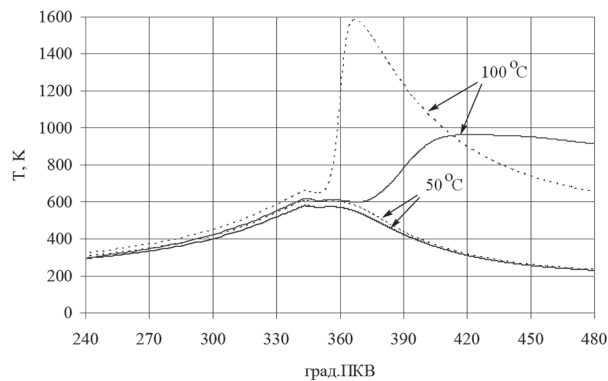


Рис. 15. Индикаторная температура газов при степени сжатия 12,5 (—) и 14,5 (.....) и различных температурах стенок КС ($t_0 = 5^\circ\text{C}$)

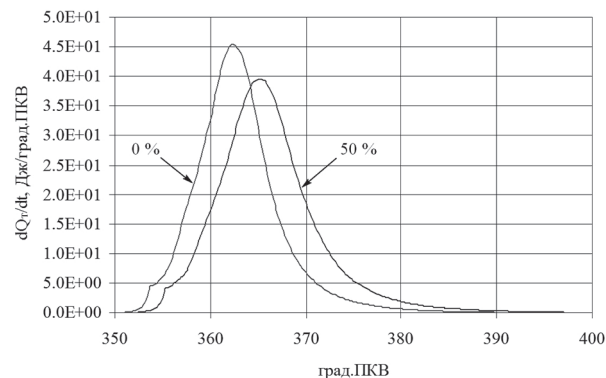


Рис. 16. Тепловыделение при сгорании топлива в КС при различных начальных долях продуктов сгорания в воздухе ($t_0 = -25^\circ\text{C}$; $t_{\text{п}} = 150^\circ\text{C}$)

- разработанная математическая модель имплементирована в трехмерную газодинамическую модель процессов в камере сгорания дизеля.

В ходе расчетного исследования химической кинетики реакций горения топлива на режимах пуска дизеля установлено:

- для обеспечения воспламенения топлива в КС необходимая величина локальных температур рабочего тела должна составлять не менее 1350 К;

- допустимая доля оксида углерода в рабочем теле на режиме сопровождения подогревателем воздуха на впуске не должна превышать 40 %;

- увеличение степени сжатия при постоянной температуре мало влияет на химическую кинетику предпламенных процессов и скорость реакции горения (положительный эффект от роста степени сжатия на пусковые характеристики дизеля обусловлен, главным образом, ростом температуры сжатия);

- температура стенок КС имеет преобладающее влияние на возможность воспламенения топлива в КС, ее минимальная величина зави-

сит от температуры среды, частоты вращения коленчатого вала, степени сжатия, концентрации продуктов сгорания подогревателя воздуха на впуске.

Результаты исследования были использованы Южно-Уральским государственным университетом при выполнении работ по доводке дизелей производства ООО «ЧТЗ – Уралтрак» с целью обеспечения их соответствия требованиям нормативно-технических документов к пусковым качествам.

Работа выполнена при методической и научной поддержке фирмы AVL (г. Грац, Австрия) (Agreement for Use of Simulation Software AVL BOOST, AVL CRUISE, AVL EXCITE and AVL FIRE between SUSU (Chelyabinsk, Russia) and AVL LIST GmbH (Graz, Austria)) в части, касающейся верификации математической модели.

Литература

1. Купершмидт В.Л. Улучшение пусковых качеств дизелей // Тр. НАТИ. Вып. 200. М.: ОНТИ НАТИ, 1968. С. 15–22.
2. Разлейцев Н.Ф. Моделирование и оптимизации процесса сгорания в дизелях. Харьков: Вища школа, 1980. 169 с.
3. Hiroyasu H., Kadota T., Arai M. Development and use of a spray combustion modeling to predict diesel engine efficiency and pollutant emissions // Bull. JSME. 1983. Vol. 26. No 214. P. 576–583.
4. Pitz W., Cernansky N., Dryer F., Egolfopoulos F. Development of an experimental database and chemical kinetic models for surrogate gasoline fuels // SAE Paper 2007-01-0175. 2007. P. 1–25.
5. Burcat A., McBride B. Ideal gas thermodynamic data for combustion and air-pollution use // Techno Report TAE. No 697. 1993.
6. Потехин В.М. Основы теории химических процессов технологии органических веществ и нефтепереработки. М.: Химиздат, 2007. 944 с.
7. McBride B., Gordon S., Reno M. Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual // NASA Report TM-4513, 1993. 250 p.
8. Daubert T., Danner R. Physical and thermodynamic properties of pure chemicals: Data compilations. Taylor & Fransis, 1994. 142 p.
9. Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Моделирование систем. Практикум по компьютерному моделированию. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 352 с.
10. Petzold L.R. A description of DASSL: A differential/algebraic system solver // Scientific Computing, 1983. P. 65–68.
11. Малоземов А.А. Барельеф-термохимия: свидетельство о государственной регистрации № 2018616031, Российская Федерация. Опубликовано 21.05.2018. Бюл. № 6.
12. Fritzson P. Principles of object-oriented modeling and simulation with Modelica 3.3: A cyber-physical approach. New-York: Wiley, 2014. 1252 p.
13. OpenModelica. Режим доступа: <https://openmodelica.org> (дата обращения 24.10.2018).
14. OpenFOAM Foundation. Режим доступа: www.openfoam.com (дата обращения 24.10.2018).
15. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977. 735 с.
16. Senecal P., Schmidt D., Nouar I., Rutland C. Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization // International Journal of Multiphase Flow. 1999. No 25. P. 1073–1097.
17. O'Rourke P. Collective drop effects on vaporizing liquid sprays // PhD thesis. Princeton University. Princeton. 1981.
18. Crowe C., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles. CRC Press LLC, 1998. 509 p.
19. Bai C., Gosman A. Development of Methodology for Spray Impingement Simulation // SAE paper 950283. 1995.
20. Malozemov A.A. Development of software for calculation and optimization of diesel operating processes and fuel supply // International Conference on Industrial Engineering 2015. Procedia Engineering, 2015. No 129. Elsevier Ltd. P. 724–730.
21. Семенов Н.Н. Самовоспламенение и цепные реакции // Успехи химии. 1967. № 36. С. 3–22.

References

1. Kupersmidt V.L. Improving the starting quality of diesel engines. Tr. NATI. Vyp. 200. Moscow: ONTI NATI Publ., 1968, pp. 15–22 (in Russ.).
2. Razlejcev N.F. Modelirovanie i optimizacii procesa sgoraniya v dizelyah [Simulation and optimization of the combustion process in diesel engines]. Har'kov: Vishcha shkola Publ., 1980. 169 p.
3. Hiroyasu H., Kadota T., Arai M. Development and use of a spray combustion modeling to predict diesel engine efficiency and pollutant emissions // Bull. JSME. 1983. Vol. 26. No 214. P. 576–583.
4. Pitz W., Cernansky N., Dryer F., Egolfopoulos F. Development of an experimental database and chemical kinetic models for surrogate gasoline fuels // SAE Paper 2007-01-0175. 2007. P. 1–25.
5. Burcat A., McBride B. Ideal gas thermodynamic data for combustion and air-pollution use // Techno Report TAE. No 697. 1993.

6. Potekhin V.M. *Osnovy teorii himicheskikh processov tekhnologii organicheskikh veshchestv i neftepererabotki* [Fundamentals of the theory of chemical processes, technology of organic substances and oil refining]. Moscow: Himizdat Publ., 2007. 944 p.
7. McBride B., Gordon S., Reno M. Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual // NASA Report TM-4513, 1993. 250 p.
8. Daubert T., Danner R. Physical and thermodynamic properties of pure chemicals: Data compilations. Taylor & Fransis, 1994. 142 r.
9. Kolesov YU.B., Senichenkov YU.B. Modelirovanie sistem. Praktikum po komp'yuternomu modelirovaniyu [Modeling of systems. Workshop on computer modeling]. SPb.: BHV-Peterburg Publ., 2007. 352 p.
10. Petzold L.R. A description of DASSL: A differential/algebraic system solver // Scientific Computing, 1983. P. 65–68.
11. Malozomov A.A. Barel'ef-termohimiya [Bas-relief thermochemistry]: svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii No 2018616031, Rossijskaya Federaciya. Opublikovano 21.05.2018. Byul. No 6.
12. Fritzon P. Principles of object-oriented modeling and simulation with Modelica 3.3: A cyber-physical approach. New-York: Wiley, 2014. 1252 p.
13. OpenModelica. Rezhim dostupa: <https://openmodelica.org> (data obrashcheniya 24.10.2018).
14. OpenFOAM Foundation. Rezhim dostupa: www.openfoam.com (data obrashcheniya 24.10.2018).
15. Tihonov A.N., Samarskij A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow: Nauka Publ., 1977. 735 p.
16. Senecal P., Schmidt D., Nouar I., Rutland C. Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization // International Journal of Multiphase Flow. 1999. No 25. P. 1073–1097.
17. O'Rourke P. Collective drop effects on vaporizing liquid sprays // PhD thesis. Princeton University. Princeton. 1981.
18. Crowe C., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase flows with droplets and particles. CRC Press LLC, 1998. 509 p.
19. Bai C., Gosman A. Development of Methodology for Spray Impingement Simulation // SAE paper 950283. 1995.
20. Malozemov A.A. Development of software for calculation and optimization of diesel operating processes and fuel supply // International Conference on Industrial Engineering 2015. Procedia Engineering. 2015. No 129. Elsevier Ltd. P. 724–730.
21. Semyonov N.N. Self-ignition and chain reactions. *Uspekhi himii*. 1967. No 36, pp. 3–22 (in Russ.).

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОЧЕСЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В КАМЕРЕ ОЧЕСА ЛЬНОКОМБАЙНА

INFLUENCE OF THE DESEEDING DEVICE DESIGN ON THE AIR FLOW CHARACTERISTICS IN THE COMBING CHAMBER OF THE FLAX HARVESTER

Д.А. ШИШИН

Всероссийский научно-исследовательский институт
механизации льноводства (ФГБНУ ВНИИМЛ), Тверь,
Россия, d.shishin@vniiml.ru

D.A. SHISHIN

All Russian Research Institute for Flax Production (VNIIML), Tver,
Russia, d.shishin@vniiml.ru

Проведены исследования скорости и распределения воздушного потока в выходном окне камеры очеса льнокомбайна. Целью исследования является определение влияния конструкции очесывающего устройства на скорость и распределение воздушного потока на выходе из камеры очеса льнокомбайна. При проведении исследований использовалась методика выявления средней скорости воздуха путем исследования поля скоростей воздушного потока. В эксперименте применялись серийное и новое очесывающие устройства, установленные на устройство, позволяющее моделировать процессы очеса стеблей льна и сборку вороха. Эксперимент проводился при частоте вращения барабана 230, 280 и 330 мин⁻¹. Математическая обработка результатов данных проводилась в программах Stadia и Excel. Представлены графики распределения скоростей воздушного потока в выходном окне камеры очеса льнокомбайна. Получены уравнения регрессии, характеризующие скорость воздушного потока в зависимости от частоты вращения очесывающего барабана. Сделан вывод, что воздушный поток по площади поперечного сечения выходного окна распределяется неравномерно. Наибольшая скорость потока имеет место в верхней и левой частях окна. Установлено, что изменение конструкции очесывающего устройства практически не влияет на среднюю скорость воздушного потока. Очесывающие устройства рекомендуется применять при частоте оборотов 275...285 мин⁻¹.

Ключевые слова: очесывающее устройство, гребневой барабан, воздушный поток, скорость воздуха, камера очеса.

The speed and airflow distribution at the exits window of the combing chamber of flax harvester were studied. The aim of this study is to determine the influence of the design of the deseeding combing device on the speed and distribution of the airflow at the outlet of the comb-chamber. Standard metric technique was used to detect the average air speed by examining the field of airflows. In the experiment, the serial and new designed deseeding devices were installed on an laboratory facility that allows modeling the processes of combing of flax stems and heaping. The experiment was carried out at a drum rotation frequency of 230, 280 and 330 min⁻¹. Mathematical processing of the data was carried out with «Stadia»© and «MS Excel»© programs. The graphs of airflows' distribution at the outlet of comb chamber are presented. Obtained equations shows regressions of the speed of the airflow from the speed of the combing drum. It is concluded that the airflow over the cross-sectional area at outlet of window in deseeding device is unequal. The highest flow rate occurs in the upper and left parts of the window. It is established that the change in the design of the stripper device has practically no effect on the average speed of the air flow. Speed of the combing devices in rate of 275...285 min⁻¹. have been recommended to use as an optimal one.

Keywords: combing device, comb-drum, air flow, air flow speed, chamber of combing.

Введение

В настоящее время при уборке льна применяют устройства, основным рабочим органом которых является гребневой барабан с круговым поступательным движением зубьев (рис. 1, *а, б*) [1].

Основными недостатками этих устройств являются значительные повреждения стеблей и потери семян при очесе семенных коробочек [2, 3].

С целью повышения качества выполнения технологического процесса разработано новое очесывающее устройство с измененной формой зубьев (рис. 1, *в, з*) [4, 5].

Одним из факторов, влияющих на потери семян, является скорость и распределение воздушного потока на выходе из камеры очеса [6].

Цель исследования

Целью исследования является определение влияния конструкции очесывающего устройства на скорость и распределение воздушного потока в выходном окне камеры очеса льнокомбайна.

Материалы и методы исследования

Для выполнения поставленной цели на базе ФГБНУ ВНИИМЛ (г. Тверь) была проведена сравнительная техническая оценка серийного и нового очесывающих устройств.

При проведении эксперимента использовались методика выявления средней скорости воздуха путем исследования поля скоростей

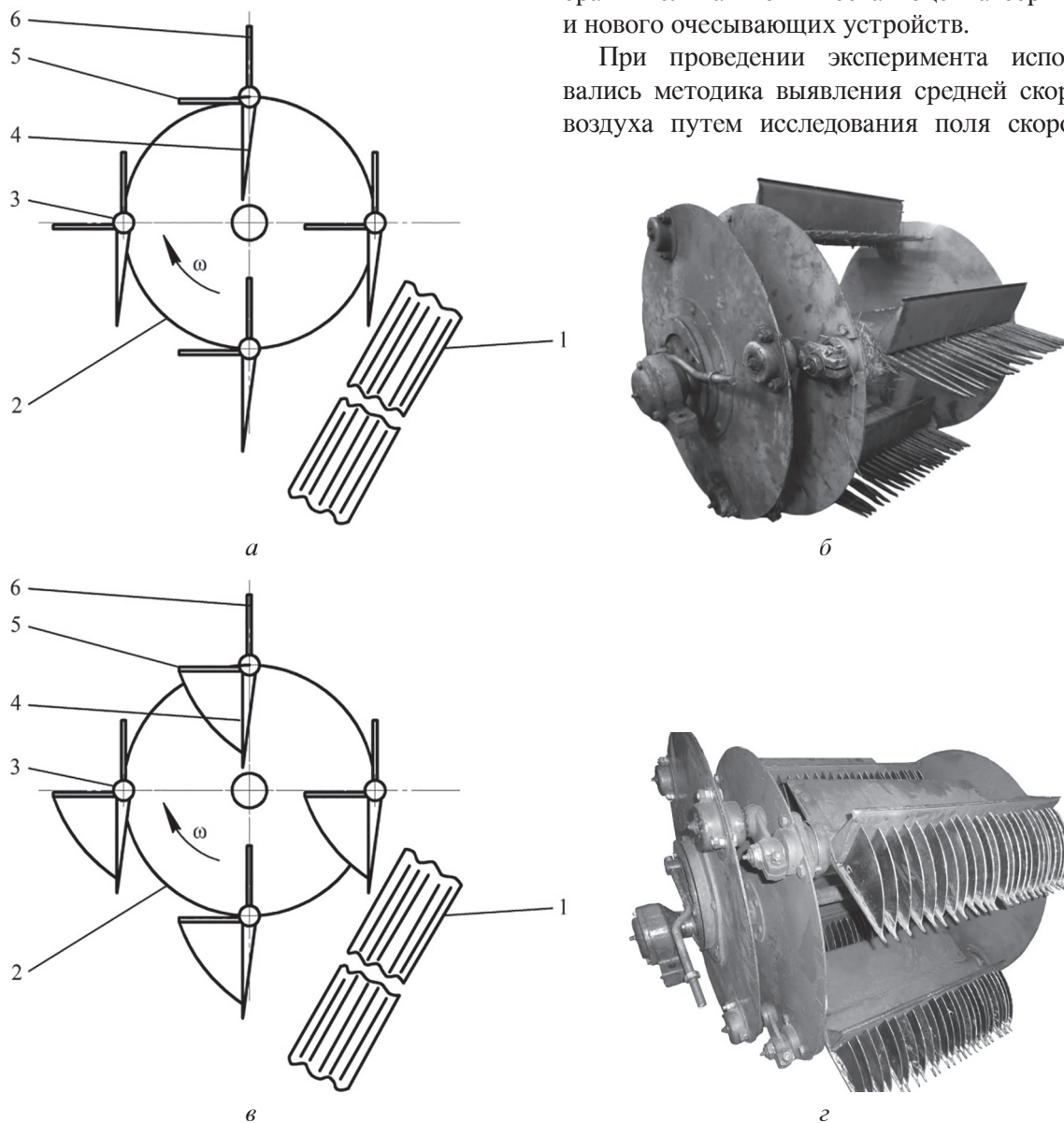


Рис. 1. Схемы и общий вид серийного и нового устройств для очеса лент льна:

а – схема серийного устройства; *б* – общий вид серийного устройства; *в* – схема нового устройства; *з* – общий вид нового устройства; 1 – зажимной транспортер; 2 – очесывающий барабан; 3 – гребень; 4 – зуб; 5, 6 – лопасти

воздушного потока [7, 8] и лабораторное оборудование (лабораторная установка, позволяющая моделировать процессы очеса стеблей льна и сбора вороха [9], чашечный анемометр). Математическая обработка результатов данных проводилась в программах Stadia и MS Excel.

Для измерения скорости воздушного потока площадь поперечного сечения выходного окна камеры очеса была разбита сеткой на 25 равно- великих площадей (рис. 2).

Замер скорости проводился при частоте вращения барабана 230, 280 и 330 мин⁻¹.

По полученным экспериментальным данным построены графики, характеризующие рас- пределение скоростей воздушного потока на выходе из камеры очеса льнокомбайна (рис. 3).

Результаты исследования и их обсуждение

На графиках видно, что у обоих очесываю- щих устройств воздушный поток в выходном окне камеры очеса распределяется неравно- мерно. Кроме того, наблюдается горизонталь-

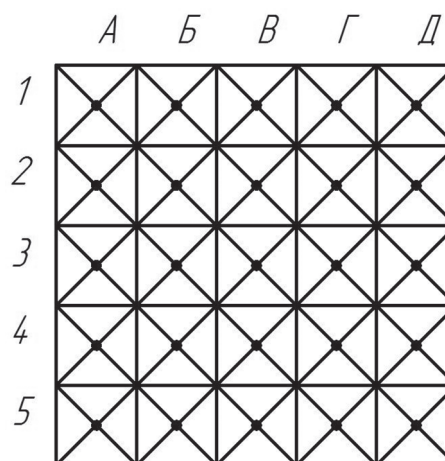


Рис. 2. Схема расположения точек замера скорости воздушного потока

ная асимметрия. Скорость воздушного потока со стороны выхода стеблей (левая часть окна) из камеры очеса выше, чем на входе (правая часть). Это связано с тем, что зубья на гребнях расположены с неравномерным зазором. Рас- стояние между зубьями уменьшается от входа

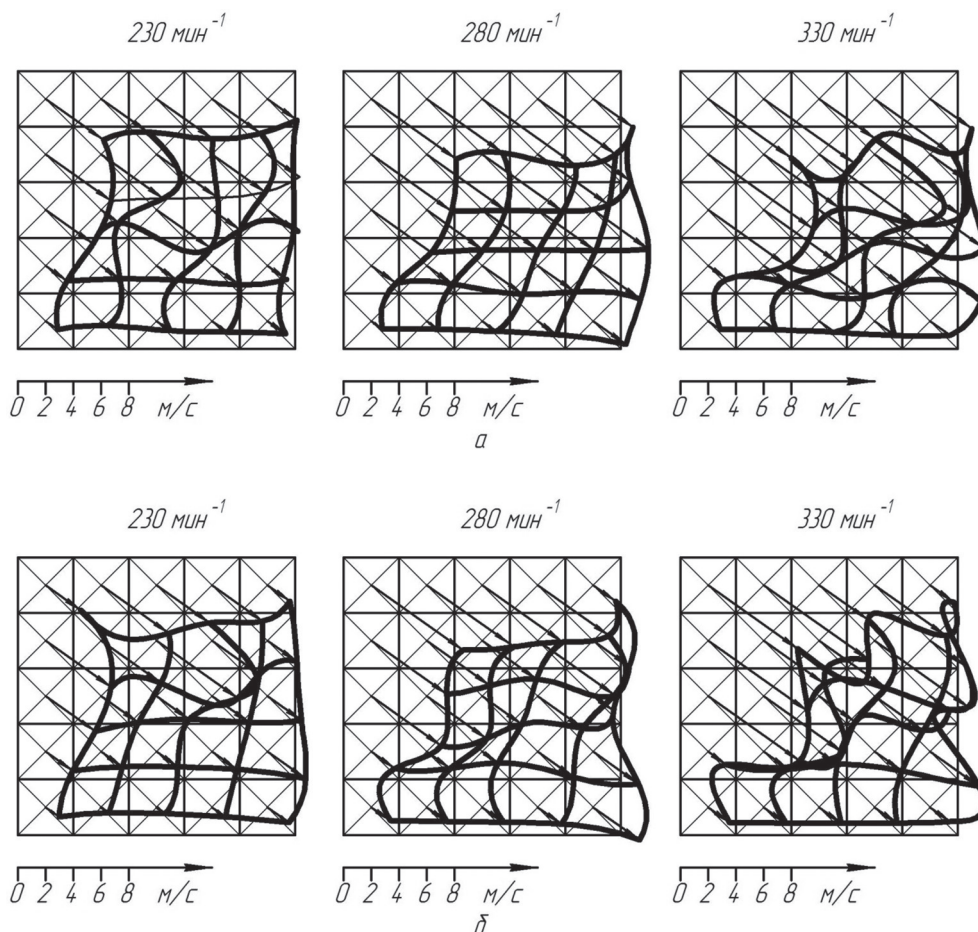


Рис. 3. Распределение скоростей воздушного потока в выходном окне камеры очеса: а – серийное очесывающее устройство; б – новое очесывающее устройство

к выходу камеры очеса, что приводит к увеличению нагнетания воздушного потока.

По результатам испытаний получены уравнения регрессии, характеризующие скорость воздушного потока V в зависимости от частоты вращения очесывающего барабана n_6 :

– серийный очесывающий барабан:

$$V_c = -0,38 + 0,016n_6, \quad (1)$$

где V – скорость воздушного потока, м/с; n_6 – частота вращения очесывающего барабана, мин⁻¹;

– новый очесывающий барабан:

$$V_n = 0,29338 + 0,013n_6. \quad (2)$$

На рис. 4 видно, что с увеличением частоты вращения очесывающего устройства средняя скорость воздушного потока увеличивается. У серийного она составила 3,3 м/с; 4,1 м/с; 4,9 м/с при 230 мин⁻¹, 280 мин⁻¹ и 330 мин⁻¹ соответственно. У нового очесывающего устройства при этих же оборотах средняя скорость – 3,3 м/с; 3,9 м/с и 4,6 м/с. Это свидетельствует о том, что очесывающие устройства дают примерно одинаковый воздушный поток.

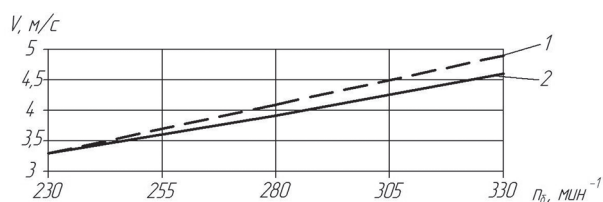


Рис. 4. Зависимость средней скорости воздушного потока в выходном окне камеры очеса от частоты вращения очесывающего устройства:

1 – серийное очесывающее устройство; 2 – новое очесывающее устройство; V – скорость воздушного потока, м/с; n_6 – частота вращения барабана, мин⁻¹

Выводы

1. Анализ результатов испытаний показал, что у обоих очесывающих аппаратов воздушный поток в выходном окне камеры очеса льнокомбайна распределяется неравномерно, наблюдаются горизонтальная и вертикальная асимметрии. Наибольшая скорость потока имеет место в верхней и левой частях окна.

2. Средняя скорость воздушного потока возрастает с увеличением частоты вращения очесывающего барабана. При этом, у нового очесывающего устройства скорость незначительно ниже.

3. Очесывающие устройства рекомендуется применять при частоте оборотов 275...285 мин⁻¹. При большей частоте увеличиваются динамические нагрузки на звенья механизмов, влияющих на долговечность работы.

Литература

1. Ростовцев Р.А. Повышение эффективности уборки льна-долгунца путем разработки технологических процессов и технических средств для их осуществления: дис. ... докт. техн. наук. Тверь, 2010. 539 с.
2. Ростовцев Р.А., Шишин Д.А. К вопросу отделения семенной части урожая от стеблей // Машинно-технологическая модернизация льняного агропромышленного комплекса на инновационной основе: сб. науч. трудов ВНИИМЛ. Тверь, 2014. С. 100–103.
3. Ковалев М.М., Галкин А.В., Фадеев Д.Г. Анализ процесса очеса стеблей // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2010. № 8. С. 10–11.
4. Ростовцев Р.А., Шишин Д.А. Устройство для очеса стеблей льна: патент на изобретение № 2567904, Российская Федерация. Опубликовано 10.11.15, Бюл. № 31.
5. Ростовцев Р.А., Шишин Д.А. Повышение эффективности уборки льна // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: матер. VIII междунар. научно-практической конференции «ИнформАгро-2016» ФГБНУ «Росинформагротех». 2016. С. 307–310.
6. Фадеев Д.Г., Галкин А.В., Фадеев В.Г. Влияние частоты вращения очесывающего барабана льнокомбайна на распределение воздушного потока на выходе вороха из камеры очеса // Наука в центральной России. 2016. № 6 (24). С. 65–72.
7. Ковалев М.М., Галкин А.В. Влияние частоты вращения барабана на величину воздушного потока и его распределение на выходе вороха из камеры очеса льнокомбайна // Наука, сельское хозяйство и промышленность – пути развития и ожидаемые результаты 2008. С. 290–295.
8. Балдин А.А. Повышение эффективности работы льноуборочного комбайна путем пневматического транспортирования вороха: дис. ... канд. техн. наук. Кострома, 2003. 144 с.
9. Ростовцев Р.А., Шишин Д.А. Установка для испытания адаптера для очеса лент льна // Инновационные разработки для производства и переработки лубяных культур: матер. междунар. науч.-практ. конф ФГБНУ ВНИИМЛ. Тверь, 2017. С. 211–213.

References

1. Rostovcev R.A. Povyshenie chffektivnosti uborki l'na-dolgunca putem razrabotki tekhnologicheskikh processov i tekhnicheskikh sredstv dlya ih osushchestvleniya: dis. ... doktor tekhn. nauk [Improving the efficiency of harvesting flax by developing technological processes and technical means for their implementation: Dissertation for Degree of Doctor of Technical Sciences]. Tver', 2010. 539 p.
2. Rostovcev R.A., SHishin D.A. Separation of the seed part of the crop from the stalks. Mashinno-tekhnologicheskaya modernizaciya l'nyanogo agropromyshlennogo kompleksa na innovacionnoj osnove [Machine and technological modernization of the linen agro-industrial complex on an innovative basis]: sb. nauch. trudov VNIIML. Tver', 2014, pp. 100–103 (in Russ.).
3. Kovalev M.M., Galkin A.V., Fadeev D.G. Analysis of stem stripping process. Mekhanizaciya i chlektifikaciya sel'skogo hozyajstva. 2010. No 8, pp. 10–11 (in Russ.).
4. Rostovcev R.A., SHishin D.A. Ustrojstvo dlya ochyosa steblej l'na [Device for deseeding of flax stems]: patent na izobretenie No 2567904, Rossijskaya Federaciya. Opublikovano 10.11.15, Byul. No 31.
5. Rostovcev R.A., SHishin D.A. Improving the efficiency of harvesting flax. Nauchno-informacionoe obespechenie innovacionnogo razvitiya APK: mater. VIII mezhdunar. nauchno-prakticheskoy konferencii «InformAgro-2016» [Scientific and informational support of innovative development of the agroindustrial complex: materials of VIII International and scientific-practical conference «InformAgro-2016»] FGBNU «Rosinformagrotekh». 2016, pp. 307–310 (in Russ.).
6. Fadeev D.G., Galkin A.V., Fadeev V.G. Influence of rotational speed of flax combing drum on air distribution at the heap outlet. Nauka v central'noj Rossii. 2016. No 6 (24), pp. 65–72 (in Russ.).
7. Kovalev M.M., Galkin A.V. The influence of the frequency of rotation of the drum on the value of the air flow and its distribution at the exit of the pile from the flax combing chamber. V knige: Nauka, sel'skoe hozyajstvo i promyshlennost' – puti razvitiya i ozhidaemye rezul'taty [In the book: Science, agriculture and industry – ways of development and expected results] 2008, pp. 290–295 (in Russ.).
8. Baldin A.A. Povyshenie chffektivnosti raboty l'nouborochnogo kombajna putem pnevmaticheskogo transportirovaniya voroha: dis. ... kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of flax harvester by pneumatic transportation of a pile: Dissertation for Degree of Candidate of Technical Sciences]. Kostroma, 2003. 144 p.
9. Rostovcev R.A., SHishin D.A. Installation for testing adapter for flax stripping. Innovacionnye razrabotki dlya proizvodstva i pererabotki lubyanyh kul'tur: mater. mezhdunar. nauch.-prakt. konf FGBNU VNIIML [Innovative developments for the production and processing of bast crops: mater. international scientific-practical conference of Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Research Institute of Flax Farming Mechanization»]. Tver', 2017, pp. 211–213 (in Russ.).

АГРЕГАТ ДЛЯ ВНЕСЕНИЯ ПЫЛЯЩИХСЯ ИЗВЕСТКОВЫХ УДОБРЕНИЙ

THE UNIT FOR MAKING DUSTY LIME FERTILIZERS

А.Н. СЕДАШКИН, К.Т.Н.
Е.А. МИЛЮШИНА, К.Т.Н.
А.А. КОСТРИГИН, К.Т.Н.
А.В. ДРАГУНОВ

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарева», Саранск, Россия, kostrigin42@mail.ru

A.N. SEDASHKIN, PhD in Engineering
E.A. MILYUSHINA, PhD in Engineering
A.A. KOSTRIGIN, PhD in Engineering
A.V. DRAGUNOV

N.P.Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia,
kotrigin42@mail.ru

В статье приводятся некоторые результаты сравнительных испытаний агрегата, проведенных в Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева при внесении пылевидных известковых удобрений с серийным и экспериментальным центробежным рабочим органом. Определено влияние поступательной скорости агрегата на неравномерность распределения цементной пыли по ширине захвата. Наблюдения показали, что при механическом разбрасывании (например, центробежным диском) удобрений с различной гранулометрической характеристикой крупные частицы под действием начальной скорости, приобретенной при спуске диска, летят дальше, а мелкие (пылевидные) ложатся на почву вблизи центра диска. Следовательно, можно полагать, что сочетание различных способов воздействия (механического и пневматического) на частицы удобрений в процессе их внесения даст желаемый результат, т.е. качественное распределение частиц независимо от их гранулометрического состава и характеристик. Анализ литературных источников показал, что работы по совершенствованию центробежного диска, с целью усилить воздушный поток, оказались малоэффективными, и машины с такими рабочими органами не получили распространения. По нашему мнению, наиболее полно возможность пневмоцентробежного рабочего органа выявляются при выполнении их конструкции по дисково-вентиляторному типу, которая предполагает при закреплении лопастей к нижней поверхности диска и дифференцированную подачу воздушного потока под частицы удобрений, высеваемых на периферийные зоны рабочей ширины захвата. Для проверки работоспособности агрегата нами проведены сравнительные испытания при разбрасывании цементной пыли с серийным и экспериментальным центробежным рабочим органом на трех скоростях движения агрегата: 2,5, 3,5 и 4,5 км/ч. С учетом данных предложений нами был изготовлен пневмоцентробежный рабочий орган и проведены лабораторные исследования. В результате исследований установлено: неравномерность распределения пылевидной массы по ширине захвата в зависимости от рабочих скоростей, значения которых указаны выше, изменялась в пределах 15–30 %, при этом наименьшая неравномерность (15 %), как при максимальных, так и при минимальных значениях подач, получена при скорости движения агрегата 4,5 км/ч, а наибольшая (30 %) – при тех же подачах и средней скорости 2,5 км/ч. Таким образом, оснащение серийных центробежных разбрасывателей предлагаемым рабочим органом превращает их в универсальные машины, способные вносить все виды минеральных удобрений, известковых материалов и их смесей, любого гранулометрического состава и нормы внесения.

Ключевые слова: мелиоранты, агрегат, пневмоцентробежный рабочий орган, внесение, равномерность, норма.

The article presents some results of comparative tests conducted at N.P.Ogarev Mordovia State University of unit when making dust-like lime fertilizers with serial and experimental centrifugal working body. The influence of the translational velocity of the unit on the uneven distribution of cement dust across the width of the grip is determined. Observations have shown that using mechanical spreading (for example, a centrifugal disk) of fertilizers with different grain-size characteristics, large particles under the action of the initial velocity acquired during the descent of the disk fly further, and small (dusty) particles fall on the soil near the center of the disk. Therefore, it can be assumed that a combination of different methods of action (mechanical and pneumatic) on the particles of fertilizers in the process of their introduction will give the desired result, i.e. qualitative distribution of particles, regardless of their particle size distribution and characteristics. Analysis of the literature showed that the work on improving the centrifugal disk, in order to increase the air flow, turned out to be ineffective and the machines with such working bodies were not widely used. In our opinion, the full potential of the pneumatic-centrifugal working body is revealed when it is designed according to a disc-fan type, which involves fixing the blades to the lower surface of the disc and differentiating air flow under the particles of fertilizers sown on the peripheral zones of the working width. To check the efficiency of the unit, we carried out comparative tests when scattering cement dust with a serial and experimental centrifugal working body at three speeds of the unit, 2,5, 3,5 and 4,5 km/h. Taking into account these proposals, we made a pneumatic-centrifugal working body and carried out laboratory tests. As a result of the laboratory studies, it was established that the uneven distribution of the pulverized mass across the width of the grip, depending on the working speeds, the values of which are indicated above, varied from 15 to 30 %; the smallest irregularity, both at maximum and minimum values of feeds, was obtained at an aggregate speed of 4,5 km/h and was 15 %, and the highest under the same conditions with an average speed of 2,5 km/h. Thus, the equipment of serial centrifugal spreaders with the proposed working body turns them into universal machines capable of introducing all types of mineral fertilizers, calcareous materials and their mixtures, of any particle size distribution and application rate.

Keywords: ameliorants, unit, pneumo-centrifugal working body, introduction, uniformity, norm.

Введение

Постоянно возрастающий объем применения минеральных удобрений требует максимального роста темпов известкования. Для выполнения такого объема работ по известкованию кислых почв необходимы высокопроизводительные машины, обеспечивающие качественное внесение известковых материалов в почву, с тем чтобы получить нужную отдачу от применения удобрений.

Поэтому задача совершенствования технологий и средств механизации для поверхностного внесения минеральных удобрений и мелиорантов является актуальной и имеет важное хозяйственное значение.

Методы и средства исследований

Для известкования кислых почв применяют слабопылящиеся и пылящиеся известковые материалы, которые часто называют известковыми удобрениями.

К пылящимся относят известковую и доломитовую муку влажностью 1,5 %, сланцевую золу, цементную пыль и др., которые имеют мелкозернистый состав различной величины. Размеры основной массы частиц находятся в пределах 0,002–0,25 мм в известковой муке (70–80 %) и (0,02–0,09) в сланцевой золе и цементной пыли (100 %) [4].

Слабопылящие формы известковых удобрений имеют совершенно отличные физико-механические свойства от пылевидных материалов. Пылевидная фракция в них составляет 40–50 % [4].

Пылящиеся известковые удобрения распределяются по полю при помощи пневматических распылителей и дисковых аппаратов.

Существует мнение, что обычный центробежный аппарат непригоден для высева пылевидных удобрений. Однако следует отметить, что это справедливо лишь при нормах меньше 5 ц/га [1, 7].

Поэтому в исследовательских целях были проведены испытания разбрасывателя минеральных удобрений с серийным и экспериментальным центробежным рабочим органом на разбрасывании цементной пыли (рис. 1).

Для экспериментальных исследований использовалась цементная пыль с размером фракций 3–5 мкм, влажностью 2–3 %, объемной массой 0,96 т/м³.

Экспериментальный центробежный рабочий орган к базовым разбрасывателям для вне-

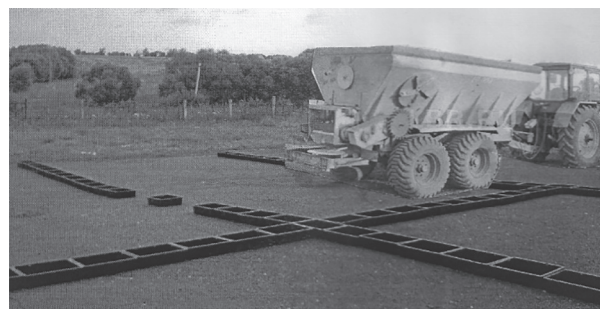


Рис. 1. Агрегат для внесения известковых удобрений

сения пылевидных материалов предлагается изготовить по дисково-вентиляторному типу, который предполагает прикрепление лопастей к нижней поверхности диска и дифференцированную подачу воздушного потока под частицы удобрений, высеваемых на периферийные зоны рабочей ширины захвата.

Следовательно, можно полагать, что сочетание механического и пневматического воздействия на частицы удобрений в процессе их внесения даст желаемый результат, т.е. качественное распределение частиц независимо от их гранулометрического состава и характеристик [2, 3].

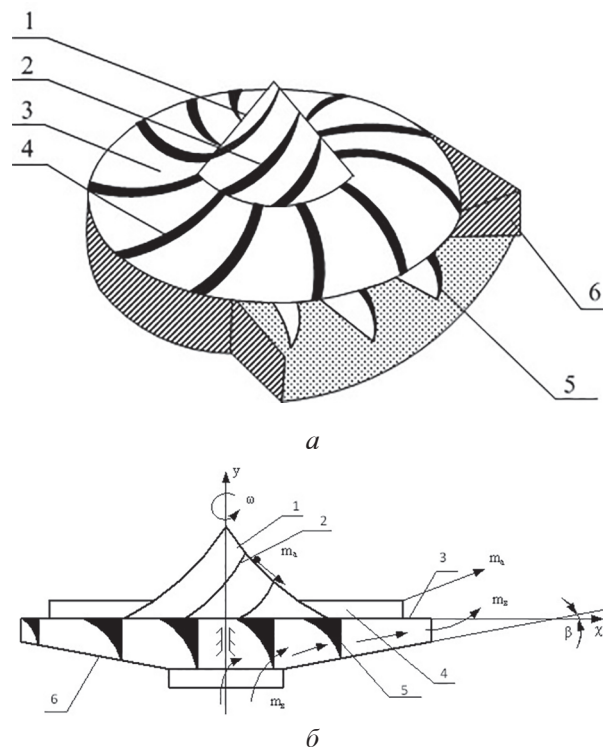


Рис. 2. Пневмоцентробежный рабочий орган:
 а – общий вид; б – схема движения частиц по поверхности рабочего органа; 1 – конус; 2 – лопасти; 3 – плоский диск; 4 – выбросные лопасти; 5 – лопасти нагнетателя воздуха; 6 – кожух нагнетателя

С учетом данных предложений нами был изготовлен пневмоцентробежный рабочий орган (рис. 2) и проведены лабораторные исследования [5].

Предлагаемый рабочий орган работает следующим образом.

Поток материала, поступивший на вершину конуса, распределяется равномерным слоем и движется вниз по конусной части рабочего органа [6].

Вследствие установки лопастей в виде логарифмической спирали под углом, меньшим или равным углу трения удобрений, происходит безударный переход удобрений с лопастей конуса на лопасти плоского диска.

Благодаря отклонению лопастей на конусной части и лопастей плоского диска вперед по направлению вращения рабочего органа удобрения, получив ускорения, распределяются всером равномерно на большей ширине полосы рассева. Одновременно с диском вращаются

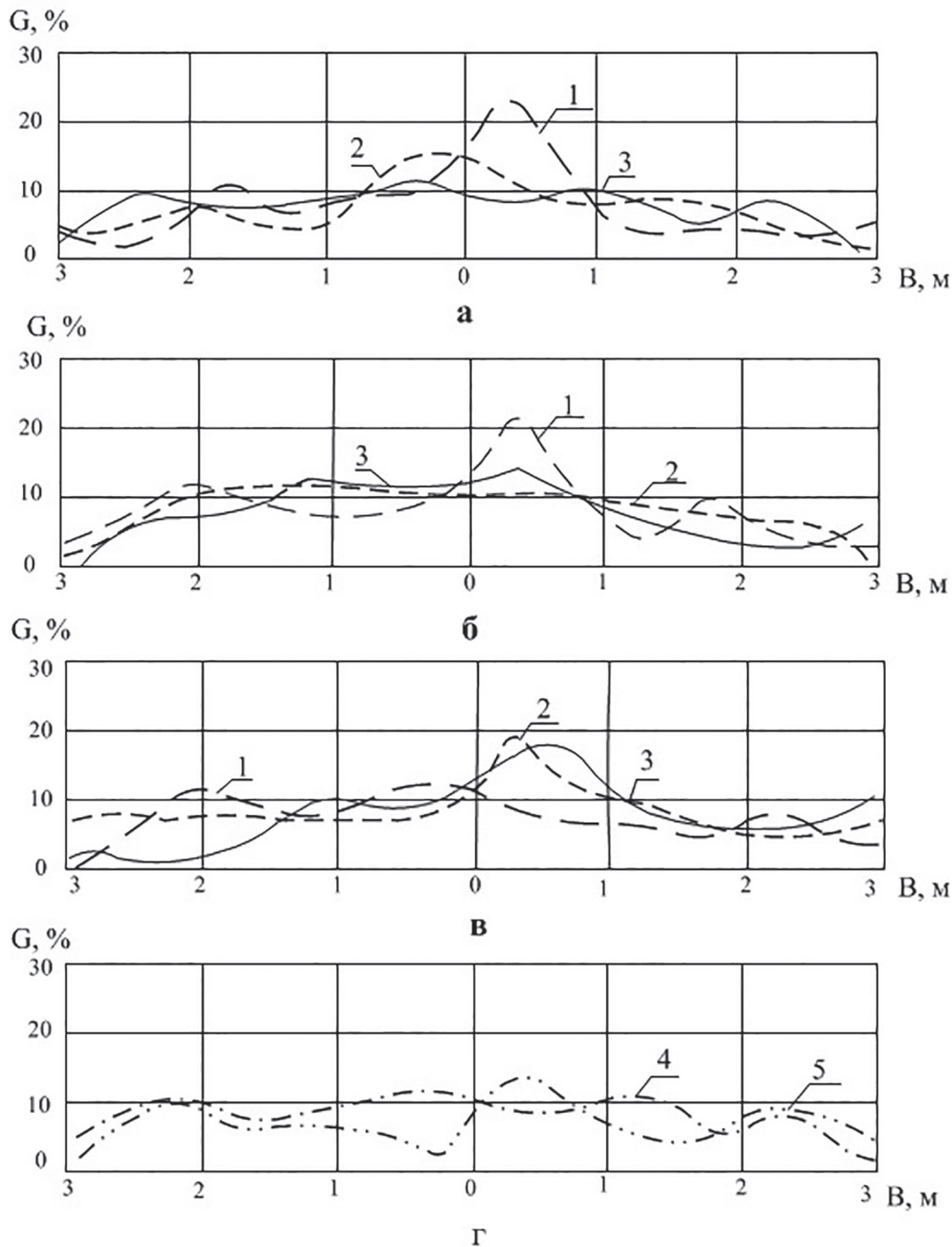


Рис. 3. Неравномерность распределения цементной пыли по ширине захвата на различных значениях скоростей движения:

- а* – при максимальной подаче; *б* – при средней подаче; *в, г* – при минимальной подаче;
 1 – скорость движения 2,5 км/ч; 2 – скорость движения 3,5 км/ч; 3 – скорость движения 4,5 км/ч;
 4 – с экспериментальным рабочим органом; 5 – с серийным рабочим органом

вентиляторные лопасти. Под их действием воздух забирается из атмосферы в кожух вентилятора через окно в нижней части кожуха. Затем воздух под действием центробежных сил перемещается вдоль лопастей к обечайке. По мере вращения лопастей объем потока сжатого воздуха, движущегося вдоль обечайки, увеличивается благодаря выполнению кожуха вентилятора под определенным углом, воздух из патрубка подается прямо под удобрения, слетающие с плоского диска. Таким образом, частицы удобрений, сохранив первоначальную кинетическую энергию, полученную от диска, попадают в струю сопутствующего воздушно-го потока и высеваются на периферийную зону ширины захвата.

Для проверки работоспособности агрегата нами проведены сравнительные испытания при разбрасывании цементной пыли с серийным и экспериментальным центробежным рабочим органом на трех скоростях движения агрегата: 2,5, 3,5 и 4,5 км/ч (рис. 3).

Проведенные опыты показали, что мощность, необходимая для привода транспортера и разбрасывающего механизма, равна 4,9 л. с., а норма разбрасывания пылевидной массы сильно зависит от степени заполнения кузова. При половинном заполнении кузова наибольшая норма составляла 6 т/га, при полном заполнении – 8 т/га.

Неравномерность распределения пылевидной массы по ширине захвата в зависимости от рабочих скоростей, значения которых указаны выше, изменялась в пределах 15–30 %; при этом наименьшая неравномерность (15 %), как при максимальных, так и при минимальных значениях подач, получена при скорости движения агрегата 4,5 км/ч, а наибольшая (30 %) – при тех же подачах и средней скорости 2,5 км/ч. Таким образом, можно сделать вывод о том, что неравномерность распределения цементной пыли по ширине захвата в значительной мере зависит от скорости движения агрегата.

Определено, что с повышением скорости движения при максимальной подаче имеет место увеличение нормы внесения, которое объясняется увеличением вибраций, создающих благоприятные условия для поступления материала из кузова машины.

Как показали исследования, центробежный дисковый рабочий орган может применяться не только для внесения минеральных и слабопылящихся, а также и для пылящихся

известковых удобрений. Желательно только использование для этих целей специально оборудованного рабочего органа, сочетающего механическое и пневматическое воздействие на частицы удобрений в процессе их внесения.

Заключение

Разбрасывание цементной пыли можно механизировать при помощи агрегата, который объединяет колесный трактор и двухдисковый разбрасыватель, оборудованный экспериментальным центробежным рабочим органом.

Однако, как показали исследования, только широкие производственные испытания помогут выявить достоинства и недостатки подобного способа, на основе которых будут даны рекомендации по его внедрению.

Литература

1. Назаров С.И. Экспериментально-теоретические основы механизации процесса сплошного внесения минеральных удобрений: автореф. дис. докт. техн. наук: 05. 20.01. Минск, 1970. 48 с.
2. Седашкин А.Н., Костригин А.А., Драгунов А.В. Пневмомеханический центробежный разбрасыватель мелиорантов // Сельский механизатор. 2017. № 5. С. 12.
3. А. С. № 1618316 МКИ³ А 01С 17/00 СССР Рабочий орган для внесения минеральных удобрений / А.Н Седашкин, Н.С. Колесников, М.Н. Чаткин. Оpubл. 07.01.91. Бюл. № 1.
4. Якубаускас В.И. Технологические основы механизированного внесения удобрений. М.: Колос. 1973. 225 с.
5. Седашкин А.Н., Костригин А.А., Драгунов А.В. Универсальный пневмоцентробежный рабочий орган для внесения мелиорантов. // Сельский механизатор. 2018. № 1. С. 6–7.
6. Седашкин А.Н., Милюшина Е.А., Даськин И.Н., Костригин А.А. Обоснование зон движения частицы удобрений по конической поверхности центробежного рабочего органа // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвуз. сб. науч. тр. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 531–535.
7. Седашкин А.Н., Костригин А.А., Даськин И.Н. Рациональные параметры рабочего органа для внесения минеральных удобрений на склоне // Ресурсосберегающие экологически безопасные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции: материалы IX Международной научно-практической конференции. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2013. С. 361–369.

References

1. Nazarov S.I. Eksperimental'no-teoreticheskie osnovy mekhanizacii processa sploshnogo vneseniya mineral'nyh udobrenij: avtoref. dis. dokt. tekhn. nauk [Experimental and theoretical foundations of the mechanization of the process of continuous application of mineral fertilizers: abstract of Dissertation for Degree of Candidate of Technical Sciences]: 05. 20.01. Minsk, 1970. 48 p.
2. Sedashkin A.N., Kostrigin A.A., Dragunov A.V. Pneumatic-mechanical centrifugal ameliorants spreader. Sel'skij mekhanizator. 2017. No 5, pp. 12 (in Russ.).
3. A. S. No 1618316 MKI3 A 01S 17/00 SSSR Rabochij organ dlya vneseniya mineral'nyh udobrenij [The working body for the application of mineral fertilizers]. A.N Sedashkin, N.S. Kolesnikov, M.N. CHatkin. Opubl. 07.01.91. Byul. No 1.
4. YAkubauskas V.I. Tekhnologicheskie osnovy mekhanizirovannogo vneseniya udobrenij [Technological basis of mechanized fertilization]. Moscow: Kolos Publ. 1973. 225 p.
5. Sedashkin A.N., Kostrigin A.A., Dragunov A.V. Universal pneumo-centrifugal working body for making ameliorants. Sel'skij mekhanizator. 2018. No 1, pp. 6–7 (in Russ.).
6. Sedashkin A.N., Milyushina E.A., Das'kin I.N., Kostrigin A.A. Justification of areas of movement of fertilizer particles on the conical surface of the centrifugal working body. EHnergoehffektivnye i resur-soberegayushchie tekhnologii i sistemy: mezhvuz. sb. nauch. tr. [Energy efficient and resource-saving technologies and systems: interuniversity collection of scientific works]. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta Publ., 2014, pp. 531–535 (in Russ.).
7. Sedashkin A.N., Kostrigin A.A., Das'kin I.N. Rational parameters of the working body for the application of mineral fertilizers on the slope. Resur-soberegayushchie ehkologicheski bezopasnye tekhnologii proizvodstva i pererabotki sel'skohozyajstvennoj produkcii: materialy IX Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Resource-saving, environmentally friendly technologies for the production and processing of agricultural products: materials of the IX International Scientific and Practical Conference]. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta Publ., 2013, pp. 361–369 (in Russ.).

ДИФФЕРЕНЦИРОВАННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УПРОЧНЯЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ НА РЕЖУЩИХ ЛЕЗВИЯХ ГРУНТООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН

DIFFERENTIAL DISTRIBUTION OF HARDENING MATERIALS ON CUTTING BLADES OF SOIL PROCESSING MACHINES

В.И. МЯЛЕНКО, д.т.н.

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Кемеровский государственный сельскохозяйственный
институт», г. Кемерово, Россия, library@ksai.ru

V.I. MYALENKO, DSc in Engineering

Kemerovo State Agricultural Institute, Kemerovo, Russia,
library@ksai.ru

Режущие лезвия рабочих органов грунтообрабатывающих машин вследствие их интенсивного абразивного износа во многом влияют на эксплуатационную надежность и производительность работающей техники. Для увеличения эксплуатационного ресурса лезвия упрочняют твердосплавными материалами, целесообразное расходование которых требует определения рациональных зон их нанесения на лезвия и обоснование их геометрических параметров. Предлагается метод определения геометрических размеров слоя упрочняющих материалов, предварительно наносимых на режущие лезвия грунтообрабатывающих машин. Алгоритмика метода заключается вначале в выявлении величин нормальных давлений, действующих со стороны обрабатываемых грунтов на лезвия, и построение соответствующих эпюр характера изменения нагрузок на поверхности лезвия. Характер распределения нагрузок на лезвия грунтообрабатывающих машин рационально определять путем специального нанесения легкоизнашиваемых материалов по поверхности трения. Быстрый износ этих материалов с различной интенсивностью на разных участках трения характеризует распределение реальных нагрузок, действующих на лезвия со стороны обрабатываемых грунтов. Затем после анализа эпюр с учетом характеристик обрабатываемых грунтов, а также свойств упрочняющих материалов, наносимых на лезвия, и ожидаемого ресурса лезвия определяются размеры наносимого слоя упрочняющих материалов. Геометрия распределения упрочняющих материалов и конкретные размеры их сечений выбираются по подобию значений кривых эпюр нормальных давлений, возникающих в условиях реальной эксплуатации. Таким образом, предлагаемое дифференцированное распределение упрочняющих материалов по поверхности лезвий грунтообрабатывающих машин позволяет производить рациональное расходование материалов в условиях абразивного износа рабочих органов и обеспечивает необходимую эксплуатационную долговечность.

Ключевые слова: эпюра нормального давления, интенсивность износа, упрочняющий материал.

The cutting blades of the working bodies of the soil-processing machines due to their intense abrasive wear largely influence the operational reliability and performance of the working machinery. To increase the service life of the blade the carbide materials are harden, the appropriate expenditure of which requires the definition of rational zones and geometric parameters of more or less of their application to the blade. A method is proposed for determining the geometrical dimensions of a layer of hardening materials of soil-processing machines previously applied to cutting blades. The algorithm of the method consists in first identifying the magnitudes of the normal pressures acting on the side of the treated soils on the blades and building the corresponding plots of the nature of the change in loads on the blade surface. The nature of the distribution of loads on the blades of soil-processing machines is rational to determine by special application of wearable materials over the friction surface. The rapid wear of these materials with different intensity in different areas of friction characterizes the distribution of real loads acting on the blades from the treated soils. Then, after analyzing the plots, taking into account the characteristics of the treated soils, the properties of the reinforcing materials applied to the blades and the expected blade life, the size of the applied layer of reinforcing materials is determined. Then, after analyzing the plots, taking into account the characteristics of the treated soils, the properties of the reinforcing materials applied to the blades and the expected blade life, the size of the applied layer of reinforcing materials is determined. The geometry of the distribution of reinforcing materials and the specific dimensions of their cross-sections are chosen in a way similar to the values of the curves for the epures of normal pressures arising under actual operating conditions. Thus, the proposed differentiated distribution of reinforcing materials over the surface of the blades of soil-processing machines allows for rational use of materials under conditions of abrasive wear of the working bodies and provides the necessary operational durability.

Keywords: plot of normal pressure, wear rate, reinforcing material.

Введение

Эффективность использования грунтообрабатывающей техники во многом связана с ее эксплуатационной надежностью и, в частности, с состоянием режущих лезвий рабочих органов. Затупление лезвий грунтообрабатывающих машин снижает производительность и качество выполнения технологических операций, что приводит порой к техническим отказам. Лезвия отвалов грунтообрабатывающих машин, упрочненные твердосплавным материалом, также часто затупляются, что приводит к вынужденным остановкам машин для их переналадки. Высокая стоимость твердосплавных материалов и необходимость обеспечения эксплуатационной надежности машин ставят актуальную техническую задачу выбора рациональных конструктивных параметров нанесения твердосплавных материалов на режущие лезвия грунтообрабатывающей техники, обеспечивая тем самым достаточную долговечность.

Цель исследования

Разнообразные по геометрическим формам и испытываемым нагрузкам рабочие органы грунтообрабатывающих машин предполагают в каждом конкретном случае индивидуальный подход к выбору параметров нанесения твердосплавного материала на их лезвия. Целью настоящей работы является поиск обобщенного алгоритма последовательных действий по определению конструктивных параметров нанесения упрочнений на лезвия.

Материалы и методы

Механизм износа лезвий рабочих органов грунтообрабатывающих машин связан с наличием абразивных частиц непосредственно в грунтах, так же как и в естественном сложении почвы сельскохозяйственного назначения. Посредством абразивных частиц происходит истирание (вынос) металла с поверхности лезвий рабочих органов. На рис. 1 изображены представители рабочих органов грунтообрабатывающих машин: профиль отвала грейдера (рис. 1, а), рыхлящий зуб (рис. 1, б) и корпус плуга (рис. 1, в), которые все имеют подобную природу износа. При износе режущие лезвия теряют незначительный вес и быстро затупляются, требуя ремонта и восстановления [1]. При этом на выбракованных деталях в отдельных местах, как правило, остается твердо-

сплавный материал, что характеризует его не рациональное исходное нанесение. Рациональные технологии предварительного упрочнения являются довольно сложными инженерными процедурами в части расходования наплавленных материалов и выбора локальных мест их нанесения [2]. Всякие теоретические выявления локальных мест нагружения требуют своих экспериментальных подтверждений [3]. Здесь важно знать точные места или локальные участки большего или меньшего ожидаемого износа. Видимо, необходимо учитывать различные удельные давления, возникающие при работе на поверхности рабочего органа, и затем уже дифференцированно распределять наплавочный материал по поверхности лезвия рабочего органа.

В настоящей работе предложено решение технической задачи по выявлению характера изменения реальных нагрузок на режущие лезвия рабочих органов грунтообрабатывающих машин.

Логическая последовательность решения складывалась из следующих этапов. Вначале на режущее лезвие наносился тонкий слой материала низкой износостойкости. Здесь принималось во внимание классическое понятие силы трения (закон Кулона – Амонтона), где сила трения, определяющая износ, прямо пропорциональна нормальному давлению на деталь [4]. Затем измерялась толщина нанесенного слоя до и после изнашивания. Измерение толщины нанесенного слоя материала удобно производить магнитоиндукционным способом. Далее, после обработки результатов изменений, строились эпюры нормальных давлений

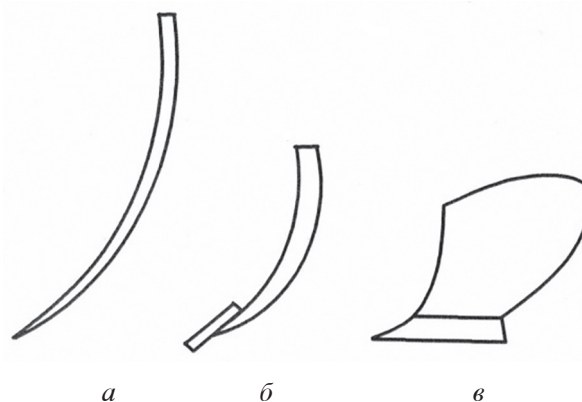


Рис. 1. Представители рабочих органов грунтообрабатывающих машин:
а) профиль отвала грейдера; б) рыхлящий зуб;
в) корпус плуга

грунта на лезвие рабочего органа и затем уже после разных преобразований определялись локальные места большего или меньшего нанесения упрочняющего материала.

Результаты и обсуждения

Общая последовательность работ складывалась из двух этапов. Первый этап заключается в выявлении составляющих прогнозного ожидания ресурса изнашиваемой детали, второй – дифференцированное распределение упрочняющих материалов на режущих лезвиях грунтообрабатывающих машин.

Интенсивность абразивного износа рабочих органов, перемещающихся в грунтах, представляет известную зависимость от следующих аргументов [5].

$$\Delta G = f(N, \Delta V, m, H, t), \quad (1)$$

где ΔV – единичный объем выносимого материала с поверхности детали при износе; m – показатель изнашивающей способности грунта; H – твердость материала изнашиваемой детали; t – время износа.

Непосредственно обрабатываемые грунты отвалами грейдеров, рыхлящими зубьями и лемехами разных плугов представляют собой чаще почвенные среды, начиная от суглинистых до песчаных, а также с включениями гравия или частиц горных пород в случаях выполнения рекультивационных работ. В зависимости от фракционного состава почвенные среды условно разделяют по своей изнашивающей способности на разные категории. По коэффициентам изнашивающей способности и наличию абразивных частиц различают категории: $m_1 = 0,37-0,65$; $m_2 = 0,5-1,3$; $m_3 = 1,3-3,0$, принятые в сравнении с эталонными значениями [5].

В свою очередь, режущие лезвия грунтообрабатывающих машин, изготавливаемые из литых сталей, – ножи отвалов грейдеров и рыхлящие зубья из сталей Л 25, а также лемехи из сталей Л 55 имеют определенную относительную износостойкость, условно принятую за единицу [4]. Последующие упрочнения изнашивающихся поверхностей деталей с использованием мартенситных или перлитных структур имеют свои условные единицы относительной износостойкости: от 1 до 7 и выше.

Предварительный прогноз ожидаемого ресурса детали, работающей в абразивной среде, можно определить по приведенной на рис. 2

номограмме. Исходя из формализованной номограммы по исходным составляющим – материал, условия эксплуатации и материал упрочнения – можно составить предварительный прогноз ожидаемого эксплуатационного ресурса детали, работающей в абразивной среде. Таким образом, на номограмме: L, T – конструктивные особенности детали, ΔG – ожидаемый ресурс.

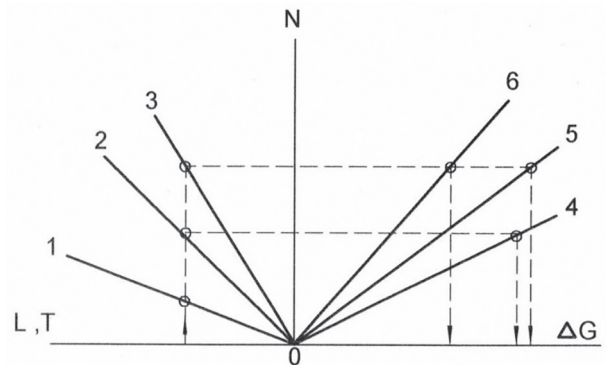


Рис. 2. Формализованная номограмма:

1, 2, 3 – категории почв по изнашивающей способности; 4, 5, 6 – категории упрочняющих материалов по относительной износостойкости

Для более точного решения поставленной задачи необходимо учитывать единичные давления, возникающие в разных точках поверхности исследуемой детали.

Испытаниям подвергались режущие лезвия – долота рыхлящего зуба (прямой клин). Использовался стенд для ускоренных имитационных испытаний деталей машин на абразивный износ, схема которого изображена на рис. 3. Стенд имеет барабан 1, в котором располагалась песчаная среда 2, а на вращающемся валу 3 с помощью стоек 4 закреплялось испы-

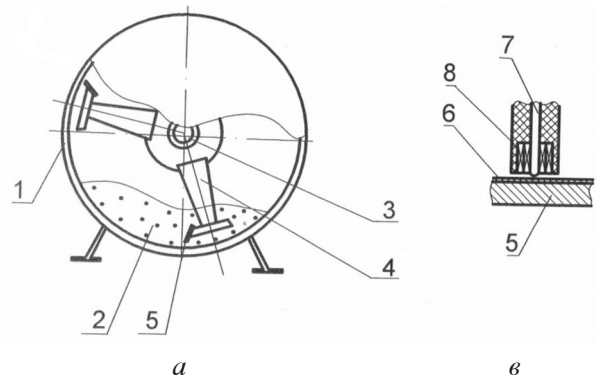


Рис. 3. Стенд для ускоренных имитационных испытаний деталей машин на абразивный износ:

1 – барабан; 2 – песчаная среда; 3 – вал; 4 – стойки; 5 – испытываемая деталь; 6 – легкоистираемый материал; 7 – сердечник; 8 – катушка

тываемое долото 5 рыхлящего зуба. На долото наносился тонкий слой легкоистираемого покрытия 6, толщина которого определялась магнитоиндукционным способом с помощью сердечника 7 с катушками 8. Испытания долот для сравнения проводились при разных углах их постановки к направлению движения рыхления.

Износ легкоистираемого слоя материала при испытаниях фиксировался по изменяемой его толщине в разных точках поверхности трения.

В результате обработки полученных данных были установлены следующие зависимости:

$$y(30^\circ) = -0,002x^3 + 0,05x^2 - 0,376x + 7,209R^2 + = 0,92; \quad (2)$$

$$y(45^\circ) = +0,023x^3 - 0,436x^2 + 1,284x + 23,444R^2 + = 0,95. \quad (3)$$

Вышеприведенные зависимости изображены графически на рис. 4 в качестве эпюр интенсивности износа (нормальных давлений) в зависимости от координаты отстояния от лезвия долота рыхлящего зуба в двух разных функциях углов наклона долота: $y(30^\circ) = f(L)$ и $y(45^\circ) = f(L)$.

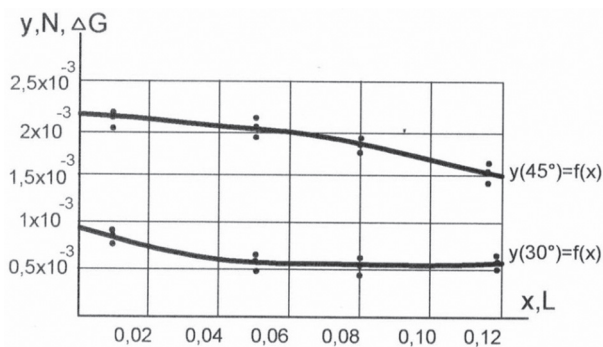


Рис. 4. Эпюры интенсивности износа:

ΔG – величины интенсивности износа (пропорциональны нормальным давлениям N y – ось ординат); L – длина лезвия (x – ось абсцисс)

Далее, исходя из предполагаемых условий работы, материала детали и ожидаемого ресурса ее работы по номограмме рис. 3 назначается соответствующая толщина нанесения упрочняющего материала. В практике для сталей 25 и 55 толщина упрочняющего материала, как правило, назначается в интервале $n = 1,5-6,0$ мм.

Учитывая реальный характер нагружения детали в конкретных условиях эксплуатации

и принимая назначенное значение толщины упрочняющего слоя материала в качестве n_{\min} , то есть минимальный равномерный слой, переходим к следующему соотношению:

$$\frac{n_{\min}}{y_{\min}} = \frac{n_i}{n_i}, \quad (4)$$

где n_{\min} – минимальная толщина условно первоначального равномерного слоя нанесения упрочняющего материала; y_{\min} – минимальное значение функции $y(45^\circ) = f(L)$; n_i, y_i – текущие значения показателей.

Тогда условно равномерный слой упрочнения необходимо увеличить по толщине на некоторую величину поверхностного завершения.

Для окончательного контура обозначенное соотношение $\frac{n_{\min}}{y_{\min}}$ принимаем в качестве коэффициента приведения к и получаем текущее значение толщины слоя нанесения упрочнения:

$$n_i = k y(45^\circ) = k (0,023 L^3 - 0,436 L^2 + 1,284L + 23,444), \quad (5)$$

где текущее значение аргумента L представляют собой расстояние от кромки лезвия долота.

Таким образом, получены значения функции $n_i = k f(L)$ дифференцированного распределения упрочняющего материала по лезвию рыхлящего зуба (прямого клина). При расчете расхода упрочняющего материала можно исходить из площади сечения криволинейной трапеции

$$S_{(45^\circ)} = k \int_0^{0,12} \left(0,023L^3 - 0,436L^2 + 1,234L + 23,444 \right) dL .$$

Выводы

Для выявления характера распределения давления на лезвия рабочих органов грунтообрабатывающих машин, а также локальных участков большего или меньшего ожидаемого износа целесообразно, предварительно для анализа, использовать легкоизнашиваемые материалы, специально наносимые на исследуемые детали в качестве индикаторов внешнего нагружения.

При рациональном использовании и расходовании материалов твердосплавных покрытий следует выбирать параметры их нанесения с учетом индивидуальных условий последующей практики эксплуатации, при этом тол-

щины их нанесения производить по подобию кривой эпюры нормальных давлений, которые возникают в условиях реальных работ.

Литература

1. Бернштейн Д.Б. Абразивное изнашивание лемешного лезвия и работоспособность плуга // Тракторы и сельхозмашины. 2002. № 6. С. 39–42.
2. Новиков В.С. Упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин. М.: ФГБОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина. 2013. 112 с.
3. Мяленко В.И. Моделирование надежности при проектировании почворезущих деталей сельхозмашин // Тракторы и сельхозмашины, 2015. № 3. С. 44–47.
4. Чичинадзе А.В., Браун Э.Д., Буше Н.А., Буяновский И.А., Геккер Ф.Р., Горячева И.Г., Гриб В.В., Демкин Н.Б., Добыгин М.Н., Евдокимов Ю.А., Захаров С.М., Кершепбаум В.Я., Лужнов Ю.М., Михин Н.М., Романова А.Т., Фуке И.Г. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под общ. ред. А.В. Чичинадзе, 2-е изд. переработ. и доп. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.
5. Севернев М.М., Подлекаев И.И., Сохадзе В.Ш. Критиков В.О. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин / под ред. М.М. Севернева. Минск: Белорус. наука, 2011. 333 с.

References

1. Bernshtejn D.B. Abrasive plow blade wear and plow performance. *Traktory i s.-h. mashiny*, 2002. No 6, pp. 39-42 (in Russ.).
2. Novikov V.S. Uprochnenie rabochih organov pochvoobrabatyvayushchih mashin [Hardening the working bodies of tillage machines]. Moscow: FGBOU VPO MGAU im. V.P. Goryachkina Publ., 2013. 112 p.
3. Myalenko, V.I. Simulation of reliability in the design of soil-cutting parts of agricultural machinery. *Traktory i s.-h. mashiny*, 2015. No 3, pp. 44–47 (in Russ.).
4. CHichinadze A.V., Braun E.H.D., Bushe N.A., Buyanovskij I.A., Gekker F.R., Goryacheva I.G., Grib V.V., Demkin N.B., Dobygin M.N., Evdokimov YU.A., Zaharov S.M., Kershepbaum V.YA., Luzhnov YU.M., Mihin N.M., Romanova A.T., Fuks I.G. *Osnovy tribologii (trenie, iznos, smazka)* [The basics of tribology]. Pod obshch. red. A.V. CHichinadze, 2-e izd. pererabot. i dop. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2001. 664 p.
5. Severnev M.M., Podlekaev I.I., Sohadze V.SH. Kiritikov V.O. *Iznos i korroziya sel'skohozyajstvennyh mashin* [Wear and corrosion of agricultural machinery]. Pod red. M.M. Severneva. Minsk: Belarus. nauka Publ., 2011. 333 p.

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН ПУТЕМ НАНЕСЕНИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

INCREASE OF DURABILITY OF WORKING BODIES OF TILLAGE MACHINES BY APPLYING METAL-CERAMIC COATINGS

Н.В. ТИТОВ, К.Т.Н.

Орловский государственный аграрный университет
имени Н.В. Парахина, Орел, Россия, ogau@mail.ru

N.V. TITOV, PhD in Engineering

Oryol State Agrarian University n.a. Nikolay Parakhin, Oryol,
Russia, ogau@mail.ru

В настоящее время наиболее перспективными для повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин являются металлокерамические материалы, которые наносятся на режущие поверхности в виде покрытий. Перспективным способом создания металлокерамических покрытий является карбовибродуговое упрочнение (КВДУ). При КВДУ на упрочняемую поверхность наносится многокомпонентная паста, содержащая металлическую матрицу, керамические компоненты и активатор процесса горения дуги (криолит), которая после высыхания расплавляется вибрирующим угольным электродом с образованием металлокерамического покрытия. Целью работы является обоснование целесообразности использования матричного порошка на железной основе в составе многокомпонентных паст для КВДУ с целью улучшения структуры и физико-механических свойств металлокерамических покрытий и повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин. При проведении исследований в качестве матричного материала многокомпонентных паст для КВДУ использовали порошки ПР-Х30СРНДЮ на железной основе и ПР-НХ17СР4 на никелевой основе, в качестве керамических компонентов паст – карбиды бора и кремния. Наибольшую микротвердость (1354 HV) имеют металлокерамические покрытия, полученные на пастах, содержащих матричный порошок ПР-Х30СРНДЮ и карбид бора. Микроструктура полученных покрытий плотная и практически беспористая, а их износ в 3,6 раза меньше, чем износ стали 30ГР, принятой за эталон сравнения. Использование в составе паст матричного порошка ПР-НХ17СР4 приводит к существенному снижению микротвердости металлокерамических покрытий (1033 HV – при использовании карбида бора и 942 HV – карбида кремния), они содержат значительное количество пор различного размера. Полученные данные подтверждают целесообразность использования порошка на железной основе в качестве матричного материала многокомпонентных паст для КВДУ. По результатам проведенных исследований паста должна содержать 60 % порошка ПР-Х30СРНДЮ, 30 % карбида бора и 10 % криолита. Ее использование позволит значительно повысить долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин, упрочненных металлокерамическими покрытиями, полученными при КВДУ.

Ключевые слова: рабочий орган, металлокерамическое покрытие, долговечность, карбовибродуговое упрочнение, многокомпонентная паста, почвообрабатывающие машины, матричный порошок.

Currently, the most promising way to increase the durability of the working bodies of tillage machines are metal-ceramic materials that are applied to the cutting surfaces in the form of coatings. A promising way to create metal-ceramic coatings is carbobivar hardening (CVH). When using CVH, a multicomponent paste containing a metal matrix, ceramic components and an activator of the arc burning process (cryolite) is applied onto the hardened surface, which, after drying, is melted by a vibrating carbon electrode to form a metal-ceramic coating. The aim of the work is to substantiate the feasibility of using a matrix powder on an iron basis in the composition of multicomponent pastes for CVH in order to improve the structure and physicomechanical properties of metal-ceramic coatings and increase the durability of the working bodies of tillage machines. When conducting research, iron-based powders and nickel-based powders were used as the matrix material of multicomponent pastes for the CVH, and boron and silicon carbides were used as ceramic components of the pastes. The greatest microhardness (1354 HV) are metal-ceramic coatings obtained on pastes containing matrix powder and boron carbide. The microstructure of the obtained coatings is dense and practically non-porous, and their wear is 3,6 times less than the wear of 30 GR steel adopted as the reference standard. The use of the matrix powder in the paste leads to a significant reduction in the microhardness of metal-ceramic coatings (1033 HV using boron carbide and 942 HV – silicon carbide), they contain a significant number of pores of various sizes. The obtained data confirm the feasibility of using iron-based powder as a matrix material of multicomponent pastes for CVH. According to the results of the research, the paste should contain 60 % of powder, 30 % of boron carbide and 10 % of cryolite. Its use will significantly increase the durability of the working bodies of tillage machines, reinforced with metal-ceramic coatings obtained at CVH.

Keywords: working body, cermet coating, durability, carbide-arc hardening, multi-component paste, soil tillage machines, matrix powder.

Введение

Одной из актуальных проблем современного сельскохозяйственного машиностроения является низкий ресурс рабочих органов машин для обработки почвы. Нарботка на отказ лемехов отечественных плугов на различных почвах составляет всего 5...20 га, зарубежных – 25...70 га, стрельчатых лап культиваторов и посевных комплексов – 10...40 га, дисков борон – 8...30 га [1–3]. В результате значительно возрастают затраты на обработку почвы и себестоимость полученной товарной продукции.

Основное направление повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин – применение упрочняющих технологий. Наиболее перспективными для упрочнения являются металлокерамические материалы, которые наносятся на режущие поверхности рабочих органов в виде покрытий [2, 4]. Однако большинство известных технологий нанесения данных покрытий отличают высокая стоимость оборудования, расходных материалов, значительные затраты энергии, а также сложность их реализации в условиях мелкосерийного производства и ремонтных мастерских фермерских хозяйств.

Современным способом упрочнения, в значительной степени лишенным многих из указанных недостатков, и позволяющим существенно повысить долговечность режущих поверхностей рабочих органов, является карбовибродуговое упрочнение (КВДУ) [2, 5–10]. При КВДУ на упрочняемую режущую поверхность наносится многокомпонентная паста, содержащая металлическую матрицу, упрочняющие керамические компоненты и материал, активирующий процесс горения дуги (криолит). Высохшая паста расплавляется с использованием вибрирующего угольного электрода специальной установки. При горении электрической дуги на упрочняемой поверхности из компонентов пасты образуется металлокерамическое покрытие. Одновременно с формированием покрытия идет процесс диффузионного насыщения металла упрочняемого рабочего органа углеродом, выделяющимся при горении угольного электрода [7, 9–11].

В настоящее время исследования теоретических и технологических возможностей способа КВДУ продолжаются. Однако пока еще не в полной мере рассмотрены вопросы, связанные с выбором составов многокомпонентных паст для КВДУ и рациональных режимов процесса.

В опубликованных работах по данному направлению в качестве матрицы многокомпонентных паст используют в основном порошки на никелевой основе (чаще всего порошок ПГ-10Н-01) [2, 6, 7, 10–12]. В то же время пока еще не проводились комплексные исследования по использованию в составах паст в качестве матрицы порошков на железной основе, которые имеют большее сродство с материалом упрочняемого рабочего органа. Их использование должно позволить существенно улучшить структуру и физико-механические свойства получаемых при КВДУ металлокерамических покрытий.

Цель исследования

Обоснование целесообразности использования матричного порошка на железной основе в составе многокомпонентной пасты для КВДУ с целью повышения долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Материалы и методы проведения исследований

При проведении исследований в качестве матричного материала многокомпонентных паст для КВДУ использовали порошок ПР-Х30СРНДЮ на железной основе и порошок ПР-НХ17СР4 на никелевой основе, производимые ОАО «Полема» (г. Тула). Выбор указанных порошков в качестве матричных обусловлен тем, что их широко используют для различных видов износостойкой наплавки деталей сельскохозяйственной, дорожной и автомобильной техники, шнеков экструдеров и другого технологического оборудования. В качестве керамических компонентов паст использовали карбид бора B_4C (ГОСТ 5744-85) и карбид кремния SiC (ГОСТ 26327-84). Содержание криолита в составе всех паст принимали равным 10 % [7, 10–12]. Связующим веществом являлся 50%-й водный раствор клея ПВА. После приготовления пасту наносили на металлическую подложку из стали 30ГР слоем толщиной 2,0...2,2 мм и высушивали до затвердевания. КВДУ осуществляли с использованием установки ВДГУ-2 на следующих режимах: сила тока – 70 А, частота и амплитуда вибрации угольного электрода – 10 Гц и 1,1 мм, соответственно.

Поперечные шлифы образцов для проведения экспериментальных исследований изготавливали с учетом рекомендаций, изложенных в работах [9, 13]. Микротвердость металлокерамических покрытий, полученных при КВДУ,

определяли с помощью компьютеризированного микротвердомера ПМТ-3М-01 по методу Виккерса. Нагрузка на индентор составляла 1 Н, время выдержки – 15 с. Измерение полученных отпечатков производили с помощью видеоустройства, подключенного к персональному компьютеру. Исследование микроструктуры металлокерамических покрытий проводили с использованием металлургического микроскопа OLYMPUS GX51. Лабораторные испытания на изнашивание осуществляли по методу «гильзы» на вертикально-сверлильном станке. Образцы при этом устанавливали в специальное устройство, которое закреплялось в шпинделе станка и вращалось в абразивном материале, находящемся в емкости, установленной на станине станка [10, 14]. Абразивным материалом служил кварцевый песок размером 0,16...0,32 мм. В качестве эталонных служили образцы, изготовленные из стали 30ГР. Величину износа определяли по уменьшению массы образцов. Длительность испытаний составляла 10 ч.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенные исследования позволили установить, что более высокую микротвердость имеют металлокерамические покрытия, сформированные с использованием многокомпонентных паст, в состав которых входит матричный порошок ПР-Х30СРНДЮ на железной основе (рис. 1). При этом использование в качестве керамического компонента данных паст карбида бора обеспечивает наибольшие средние значения микротвердости покрытий (1354 HV при содержании карбида бора 30 %). При использовании в составе паст матричного порошка ПР-НХ17СР4 на никелевой основе микротвердость металлокерамических покрытий существенно снижается. В среднем она составляет 1033 HV при содержании в пасте 30 % карбида бора и 942 HV – при содержании в пасте 30 % карбида кремния (рис. 1).

Исследованиями многих ученых установлено, что на границе с основным металлом микротвердость металлокерамических покрытий, полученных при КВДУ, имеет более низкие значения, чем на поверхности [2, 5, 6, 8, 9]. Проведенные в данной работе исследования подтвердили ранее полученные результаты. При этом микротвердость металлокерамических покрытий, полученных на пастах, содер-

жащих матричный порошок ПР-Х30СРНДЮ на железной основе и карбид бора, вновь оказалась наиболее высокой. Так, при использовании данных компонентов в составе паст среднее значение микротвердости покрытий составляет 1062 HV при содержании карбида бора 30 % (рис. 2). При использовании в составе пасты матричного порошка ПР-НХ17СР4 на никелевой основе микротвердость полученных покрытий вновь является более низкой. В среднем она составляет 815 HV при содержании в пасте 30 % карбида бора и 763 HV – при содержании в пасте 30 % карбида кремния.

Проведенные микроструктурные исследования показали, что структура и плотность металлокерамических покрытий, полученных с использованием различных по составу многокомпонентных паст, существенно отличаются между собой. Так, при использовании в составе паст матричного порошка ПР-Х30СРНДЮ на железной основе структура металлокерамического покрытия плотная и практически беспористая (рис. 3, а). При использовании матрично-

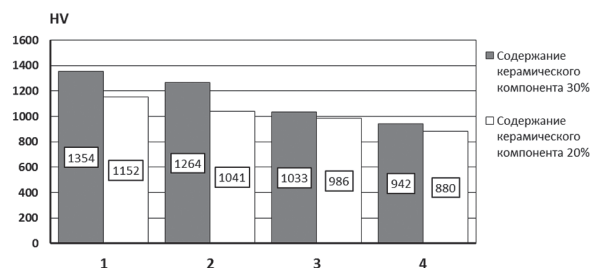


Рис. 1. Изменение микротвердости HV на поверхности металлокерамического покрытия, полученного при КВДУ. Используемые пасты: ПР-Х30СРНДЮ (матрица), карбид бора (1); ПР-Х30СРНДЮ (матрица), карбид кремния (2); ПР-НХ17СР4 (матрица), карбид бора (3); ПР-НХ17СР4 (матрица), карбид кремния (4)

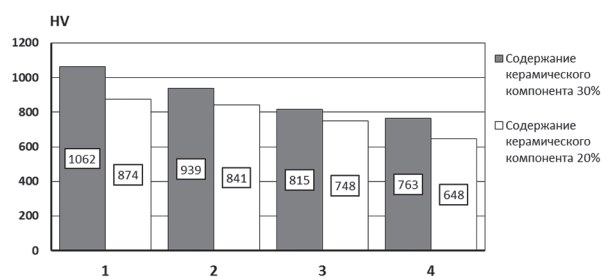


Рис. 2. Изменение микротвердости HV металлокерамического покрытия, полученного при КВДУ, на границе с основным металлом. Используемые пасты: ПР-Х30СРНДЮ (матрица), карбид бора (1); ПР-Х30СРНДЮ (матрица), карбид кремния (2); ПР-НХ17СР4 (матрица), карбид бора (3); ПР-НХ17СР4 (матрица), карбид кремния (4)

го порошка ПР-НХ17СР4 на никелевой основе структура покрытия менее плотная и содержит значительное количество пор различного размера (рис. 3, б). Полученные результаты позволяют объяснить, почему покрытия, полученные с использованием паст, матрицей которых является порошок ПР-Х30СРНДЮ, имеют наибольшие средние значения микротвердости как на поверхности покрытия, так и на границе раздела с основным металлом.

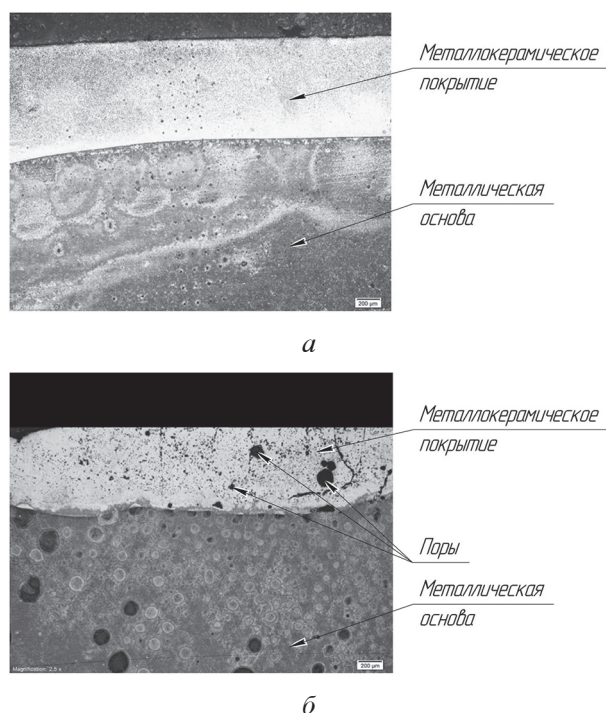


Рис. 3. Микроструктура металлокерамических покрытий, полученных с использованием паст, матрицей которых являются порошки ПР-Х30СРНДЮ (а) и ПР-НХ17СР4 (б)

Проведенные лабораторные испытания на изнашивание упрочненных КВДУ и неупрочненных эталонных образцов из стали 30ГР показали, что наибольший средний износ (0,51 г) имеют эталонные образцы (рис. 4).

Образцы, упрочненные КВДУ, имеют значительно меньшие износы. При этом минимальный износ (0,14 г) обеспечивают металлокерамические покрытия, полученные с использованием многокомпонентной пасты, содержащей 60 % матричного порошка ПР-Х30СРНДЮ на железной основе и 30 % карбида бора в качестве упрочняющего компонента. Износ металлокерамического покрытия, полученного с использованием пасты вышеуказанного состава, в 3,6 раза меньше, чем износ эталонных образцов.

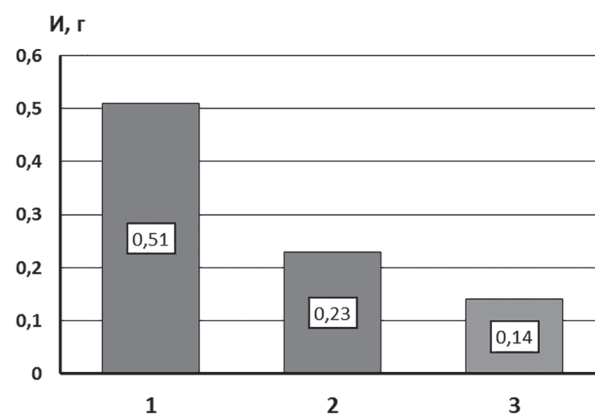


Рис. 4. Износ эталонных образцов (1) и образцов, упрочненных КВДУ. Используемые пасты: ПР-НХ17СР4 (матрица), 30 % карбида бора (2); ПР-Х30СРНДЮ (матрица), 30 % карбида бора (3)

Выводы

Таким образом, по результатам комплекса проведенных исследований доказана целесообразность использования порошка ПР-Х30СРНДЮ на железной основе в качестве матрицы многокомпонентных паст, применяемых при КВДУ рабочих органов почвообрабатывающих машин, которые эксплуатируются в условиях интенсивного абразивного изнашивания. Также определен рациональный состав многокомпонентной пасты для КВДУ: порошок ПР-Х30СРНДЮ – 60 %, карбид бора – 30 %, криолит – 10 %. Использование многокомпонентной пасты указанного состава при КВДУ рабочих органов почвообрабатывающих машин позволит значительно повысить их долговечность в эксплуатации. Это, в свою очередь, поможет снизить потребности производителей сельскохозяйственной продукции в приобретении оригинальных дорогостоящих запасных частей как отечественного, так и зарубежного производства.

Литература

1. Михальченко А.М., Будко С.И. Стойкость к абразивному изнашиванию восстановленных и упрочненных лемешных долот Lemken // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 8. С. 45–48.
2. Лялякин В.П., Соловьев С.А., Аулов В.Ф. Состояние и перспектива упрочнения и восстановления деталей почвообрабатывающих машин сварочно-наплавочными методами // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т. 115. С. 96–104.
3. Михальченко А.М., Козарез И.В., Михальченкова М.А. Износ цельнометаллических и составных лемехов // Тракторы и сельхозмашины. 2014. № 7. С. 39–43.

4. Лялякин В.П., Голубев И.Г. Перспективы восстановления деталей сельскохозяйственной техники // *Техника и оборудование для села*. 2016. № 4. С. 41–43.
5. Муртазин Г.Р., Зиганшин Б.Г., Яхин С.М. Повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин // *Техника и оборудование для села*. 2015. № 10. С. 32–34.
6. Титов Н.В., Литовченко Н.Н., Коротков В.Н. Метод вибродуговой наплавки металлокерамики деталей техники, работающей в условиях абразивного износа // *Труды ГОСНИТИ*. 2013. Т. 111. Ч. 2. С. 219–222.
7. Титов Н.В. Повышение износостойкости рабочих поверхностей стрелчатых лап почвообрабатывающих машин карбовибродуговым упрочнением // *Техника и оборудование для села*. 2015. № 11. С. 38–41.
8. Литовченко Н.Н., Куликов В.Н., Титов Н.В. Вибродуговая наплавка графитовым электродом нанометаллокерамических композиционных материалов // *Сварочное производство*. 2013. № 2. С. 51–53.
9. Лялякин В.П., Титов Н.В., Литовченко Н.Н., Ничипоренко Р.С. Карбовибродуговой метод упрочнения деталей машин, работающих в условиях абразивного износа, наплавкой металлокерамики (КВДНМК) // *Труды ГОСНИТИ*. 2014. Т. 114. С. 144–149.
10. Титов Н.В. Повышение долговечности рабочих органов плугов карбовибродуговым упрочнением их режущих поверхностей // *Труды ГОСНИТИ*. 2016. Т. 125. С. 256–261.
11. Титов Н.В., Хамзин А.В., Слободчиков Д.А. Перспективная технология восстановления и упрочнения лемехов плугов // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2016. № 3 (18). С. 218–222.
12. Титов Н.В., Виноградов В.В., Слободчиков Д.А. Импортзамещающая технология упрочнения стрелчатых лап почвообрабатывающих машин // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2016. № 1 (16). С. 138–141.
13. Бажин П.М., Столин А.М., Титов Н.В. Композиционные защитные покрытия на основе TiC-W₂C-Co, полученные электродуговой наплавкой СВС-электродами на деталях сельскохозяйственной техники // *Композиты и наноструктуры*. 2016. Т. 8. № 1. С. 58–65.
14. Михальченков А.М., Денисов В.А., Новиков А.А. Оборудование и методика проведения ускоренных сравнительных испытаний на износостойкость сталей, эксплуатируемых в почвенной среде // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. № 5. С. 46–48.
2. Lyalyakin V.P., Solov'ev S.A., Aulov V.F. Condition and prospects of strengthening and restoration of details of tillage machines by welding and surfacing methods. *Trudy GOSNITI*. 2014. Vol. 115, pp. 96–104 (in Russ.).
3. Mihal'chenkov A.M., Kozarez I.V., Mihal'chenkova M.A. Worn all-metal and composite plowshares. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2014. No 7, pp. 39–43 (in Russ.).
4. Lyalyakin V.P., Golubev I.G. Prospects for the restoration of parts of agricultural machinery. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2016. No 4, pp. 41–43 (in Russ.).
5. Murtazin G.R., Ziganshin B.G., YAhin S.M. Increasing the resource of working bodies of tillage machines. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2015. No 10, pp. 32–34 (in Russ.).
6. Titov N.V., Litovchenko N.N., Korotkov V.N. Method of vibration-arc surfacing of metal ceramics of parts of equipment operating under abrasive wear. *Trudy GOSNITI*. 2013. Vol. 111. CH. 2, pp. 219–222 (in Russ.).
7. Titov N.V. Increasing the wear resistance of the working surfaces of the lamella paws of soil-processing machines by carbovibus hardening. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2015. No 11, pp. 38–41 (in Russ.).
8. Litovchenko N.N., Kulikov V.N., Titov N.V. Vibro-arc surfacing by graphite electrode of nanometal-ceramic composite materials. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2013. No 2, pp. 51–53 (in Russ.).
9. Lyalyakin V.P., Titov N.V., Litovchenko N.N., Nychiporenko R.S. Carbofiber-arc method of hardening machine parts working under abrasive wear by metal-ceramic surfacing. *Trudy GOSNITI*. 2014. Vol. 114, pp. 144–149 (in Russ.).
10. Titov N.V. Increasing the durability of the working bodies of the plows by carbovibar hardening of their cutting surfaces. *Trudy GOSNITI*. 2016. Vol. 125, pp. 256–261 (in Russ.).
11. Titov N.V., Hamzin A.V., Slobodchikov D.A. Perspective technology of restoration and hardening of plowshares. *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2016. No 3 (18), pp. 218–222 (in Russ.).
12. Titov N.V., Vinogradov V.V., Slobodchikov D.A. Import-substituting technology hardening lancet paws tillage machines. *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. 2016. No 1 (16), pp. 138–141 (in Russ.).
13. Bazhin P.M., Stolin A.M., Titov N.V. Composite protective coatings based on TiC-W₂C-Co, obtained by electric arc surfacing with SHS-electrodes on the details of agricultural machinery. *Kompozity i nanostrukturny*. 2016. Vol. 8. No 1, pp. 58–65 (in Russ.).
14. Mihal'chenkov A.M., Denisov V.A., Novikov A.A. Equipment and methods for conducting accelerated comparative tests on the wear resistance of steels used in the soil environment. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2016. No 5, pp. 46–48. (in Russ.).

References

1. Mihal'chenkov A.M., Budko S.I. Resistance to abrasive wear of remanufactured and hardened Lemken chisels. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2012. No 8, pp. 45–48 (in Russ.).

ПРИНЦИПЫ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ В ЗАСУШЛИВЫХ УСЛОВИЯХ ЮГА РОССИИ

PRINCIPLES OF DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF TILLAGE IN ARID CONDITIONS OF THE SOUTH OF RUSSIA

Г.Г. ПАРХОМЕНКО, к.т.н.

Северо-Кавказский научно-исследовательский институт
механизации и электрификации сельского хозяйства
ФГБНУ «Аграрный научный центр «Донской»,
г. Зерноград, Россия, parkhomenko.galya@yandex.ru

G.G. PARHOMENKO, PhD in Engineering

State Scientific Establishment «Agricultural research center
«Donskoy», Zernograd, Russia, parkhomenko.galya@yandex.ru

В засушливых условиях южных регионов России возделываемые сельскохозяйственные культуры испытывают недостаток влаги. Важное значение при этом приобретает агротехнически целесообразная обработка почвы. В трещиноватом пористом массиве обработанной почвы наблюдается потеря влаги из глубины пласта при физическом испарении. Физическое испарение влаги в засушливых условиях приводит к иссушительной деградации почвы. При рыхлении только поверхностных слоев может возникнуть псевдослитизация нижней части обрабатываемого слоя, приводящая к гидролизной деградации черноземной почвы. Цель исследования: определить основные требования к агротехнически целесообразному технологическому процессу обработки почвы в засушливых условиях и к рабочим органам для его осуществления. Разработка технологического процесса обработки почвы в засушливых условиях юга России должна основываться на принципах накопления влаги внутри пласта за счет использования термодиффузионных процессов. При разнице температуры слоев почвы внутри пласта перемещается поток тепла, способствующий возникновению процесса термодиффузии влаги. Для этого обработку почвы необходимо производить дифференцированно с различной степенью уплотнения по слоям. При послойной обработке почвы внутри пласта формируется влагонакопительный слой за счет комбинации обоих типов теплообмена: инсоляции и излучения. На глубине 10–15 см пересекаются потоки влаги, доступной для корневой системы сельскохозяйственных культур. Данный процесс осуществляется унифицированной конструкцией, разработанной по методу базового агрегата с общей и сменными частями (подсистемами). Комбинация подсистем реализуется конструктивно на единой несущей системе по определенному принципу размещения с учетом длительности релаксации внутренних напряжений пласта, которая составляет 0,09–0,11 с для черноземной почвы в засушливых условиях. Расстояние в продольном направлении между блоками подсистем должно составлять не менее 0,2 м. При этом конструкции рабочих органов разрабатываются на основе взаимосвязи параметров и режимов работы с физико-механическими свойствами почвы.

Ключевые слова: почва, рабочий орган, послойная обработка, термодиффузия влаги, стойка типа paraplow.

In the arid conditions of the southern regions of Russia the cultivated crops experience a lack of moisture. At the same time, the agrotechnical cultivation of the soil becomes important. In a fractured porous massif of the treated soil, there is a loss of moisture from the depth of the reservoir during physical evaporation. Physical evaporation of moisture in dry conditions leads to a drying soil degradation. When loosening only the surface layers, pseudo-scaling of the lower part of the treated layer may occur, leading to hydrolysis degradation of the chernozem soil. Objective: to determine the basic requirements for agrotechnically appropriate technological process of tillage in dry conditions and working bodies for its implementation. The development of the technological process of tillage in dry conditions of the south of Russia should be based on the principles of moisture accumulation inside the reservoir due to the use of thermal diffusion processes. The temperature difference between the layers of the soil inside the reservoir moves the heat flow, contributing to the emergence of the process of thermal diffusion of moisture. To do this, tillage must be done differentially with varying degrees of compaction in layers. During the layer-by-layer processing of the soil inside the reservoir, a moisture accumulating layer is formed due to the combination of both types of heat exchange: insolation and radiation. At a depth of 10–15 cm the flow of moisture available to the root system of crops intersect. This process is carried out by a unified design, developed by the method of the basic unit with common and replaceable parts (subsystems). The combination of subsystems is implemented constructively on a single carrier system according to a certain allocation principle, taking into account the duration of relaxation of the internal stresses of the reservoir, which is 0,09–0,11 s for the black-earth soil in arid conditions. The distance in the longitudinal direction between the subsystem blocks should be at least 0,2 m. In this case, the structures of the working bodies are developed on the basis of the interrelation of the parameters and modes of operation with the physical and mechanical properties of the soil.

Keywords: soil, working body, layer-by-layer processing, thermal diffusion of moisture, paraplow type stand.

Введение

В.В. Докучаев, П.А. Костычев, А.А. Измальныйский, Н.М. Тулайков в своих работах отмечали, что в засушливых условиях южных регионов страны, где возделываемые сельскохозяйственные культуры испытывают недостаток влаги, а грунтовые воды залегают глубоко, важное значение приобретает обработка почвы. Механической обработкой образуется трещиноватый пористый массив почвы, внутри которого формируются преференциальные потоки влаги, направленные как вглубь пласта (при выпадении атмосферных осадков), так и к поверхности поля, приводящие к ее потере при физическом испарении. Для предотвращения физического испарения влаги из пахотного слоя, которое приводит к иссушительной деградации почвы при смыкании с атмосферной засухой, рекомендуют реже проводить глубокое рыхление и вовсе заменить его поверхностными обработками. Однако при постоянных поверхностных обработках без глубокого рыхления пласта может возникнуть так называемая (по классификации кафедры «Геохимия ландшафтов и география почв» МГУ им. М.В. Ломоносова [1]) псевдослитизация нижней части пахотного слоя, приводящая, вследствие его дегумификации, к гидролизной деградации почвы, особенно черноземной.

Цель исследования

Определить основные требования к агротехнически целесообразному технологическому процессу обработки почвы в засушливых условиях и к рабочим органам для его осуществления.

Методы исследования

В засушливых условиях возделывания сельскохозяйственных культур особое внимание следует уделять процессу термодиффузии влаги внутри пласта почвы, в основе которого заложен метод «воздушной ирригации», открытый агрономом И.Е. Овсинским еще в 19 веке. Метод основан на использовании процесса рособразования, который можно применять для накопления влаги при дифференцированной обработке слоев почвы. За счет разницы температур между горячим воздухом над почвой и прохладным внутри пласта происходит процесс рособразования. Ночью более теплый и влажный воздух из почвы конденсируется в виде влаги на поверхности. Объем такого само-

увлажнения соизмерим с требуемым для роста и развития сельскохозяйственных культур.

При разнице температур возникает термоградиент внутри пласта $\nabla t^{\circ}C$ ($^{\circ}C/cm$)

$$\nabla t^{\circ}C = \frac{t_{n+1}^{\circ}C - t_n^{\circ}C}{z_{n+1} - z_n}, \quad (1)$$

где $t_{n+1}^{\circ}C$, $t_n^{\circ}C$ – температура каждого слоя почвы, $^{\circ}C$; z_{n+1} , z_n – глубина расположения слоя, см.

При этом перемещается поток тепла, способствующий возникновению процесса термодиффузии влаги. При повышении температуры внутри пласта снижаются силы адгезии и аттракции твердой и жидкой фаз почвы, уменьшаются поверхностное натяжение влаги (при ее наличии) и гидравлический потенциал, в результате чего происходит перемещение потока в более холодном направлении за счет разницы капиллярных давлений. Процесс длится до равновесного состояния, достижению которого препятствует солнечная радиация, приводящая к нагреву почвы и являющаяся причиной десукции и испарения, вследствие чего возникают капиллярно-сорбционные силы, обеспечивающие перемещение влаги через точки соприкосновения структурных агрегатов почвы со скоростью потока, обратно пропорциональной их размерам.

В засушливых условиях внутри пласта передвижение влаги практически прекращается в связи с почти полным ее отсутствием в свободном жидком состоянии. Тогда движение влаги внутри пласта осуществляется только в виде пара за счет наличия в почве постоянно меняющихся термоградиентов посредством диффузии в сторону ее понижения (меньшей упругости насыщения пара).

Из физики земледелия известно, что процесс диффузии зависит от степени упругости насыщения пара и толщины водной пленки на структурных агрегатах почвы [2]. Процесс диффузии в почве может осложняться явлениями микроконвекции за счет термоградиентов, а также многократностью осаждения и новой дистилляцией пара. Изменение плотности пара обусловлено различием гидравлических потенциалов или температуры слоев почвы.

Термоградиент влияет на объем теплового потока Q (Дж/см):

$$Q = \lambda \cdot \nabla t^{\circ}C, \quad (2)$$

где λ – теплопроводность почвы, Дж/ $^{\circ}C$.

Наиболее значимое влияние на изменение температурного режима из всех техногенных воздействий оказывает механическая обработка почвы. Из анализа формулы (1) следует, что увеличение термоградиента в почве между обрабатываемыми слоями возможно при их малой толщине и при условии существенного различия их температуры. То есть для получения существенного различия температуры слоев обработанного пласта необходимо проведение послойной обработки почвы, а именно дифференцированное рыхление с различной степенью уплотнения по слоям.

Из физики земледелия известно, что скорость перемещения влаги зависит от диаметра структурных агрегатов, поскольку величиной последнего определяется сечение почвенных капилляров. Получение структурных агрегатов требуемого размера путем рыхления с уплотнением подповерхностного слоя почвы внутри пласта приводит к расширению диаметра почвенных капилляров, по которым перемещается влага из глубины к испаряющей поверхности. Термодиффузионный поток влаги, появление которого обусловлено наличием термоградиентов, не преодолевает поверхность раздела между широкой и узкой частями капилляров, происходит так называемое явление их пресечения, в результате чего образующийся пар не достигает поверхности поля, а медленно диффундирует внутри пласта и конденсируется в слое, который будет являться влагонакопительным.

Исследования [3] показали, что при послойной обработке почвы внутри пласта формируется влагонакопительный слой за счет комбинации обоих типов теплообмена (инсоляции и излучения), поскольку термоградиенты имеют противоположное направление, меняя знак на глубине 10–15 см, где пересекаются потоки. Влага на данной глубине является доступной для корневой системы сельскохозяйственных культур.

Известны способы послойной обработки почвы.

Согласно способу обработки почвы по а.с. № 126311 [4], внутри обрабатываемого пласта образуют уплотненную прослойку, а наружный тонкий слой сухой почвы оставляют рыхлым, что способствует сохранению влаги от испарения в атмосфере.

Аналогично способ по патенту № 294273 [5] предусматривает рыхление пласта с последующим подповерхностным созданием уплотненных зон. Под верхним слоем создают рав-

номерно в шахматном порядке уплотненные зоны, которым придают конусообразно расширяющийся книзу вид.

Способ по а.с. № 622429 [6] включает создание слоев почвы с различной плотностью при большем ее значении для среднего слоя.

Наряду с вышеизложенным, установлена возможность снижения усилий на отрыв пласта, а следовательно, и тягового сопротивления рабочих органов за счет послойной обработки почвы.

Авторами патента № 2158068 [7] предложен способ послойной обработки почвы при снижении энергозатрат за счет воздействия на пласт разнонаправленными деформациями и разрушения пласта по линиям наименьших связей. Послойное рыхление пласта производят по линиям наименьших связей за счет автоматического отклонения рыхлящих элементов рабочего органа в стороны наименьшего сопротивления деформациям.

По а.с. № 1604186 [8] крошение пласта осуществляется по линиям наименьших связей путем автоматического отклонения крошащих элементов в стороны наименьших сопротивлений деформациям за счет придания им дополнительно трех степеней свободы: вращательного и поступательных (вертикального и горизонтального) движений.

Особое внимание следует уделить разработкам ВНИПТИМЭСХ (ныне АНЦ «Донской»), подразделение «СКНИИМЭСХ») по послойной обработке почвы.

Еще в середине прошлого века сотрудниками нашего института был запатентован (а.с. № 125422 [9]) способ обработки почвы, согласно которому получение разных по структуре и плотности слоев пласта достигается путем рыхления с одновременным уплотнением, выравниванием и созданием мульчирующего слоя на поверхности поля.

По патенту № 2147163 [10], послойное рыхление осуществляется формированием вертикальных, горизонтальных и наклонных щелей внутри пласта. При этом внутри пласта образуют кротовины на стыках пересечения наклонных щелей, а на поверхности почвы горизонтальные соединяют перемычками в поперечном направлении относительно вертикальных.

Способ по патенту № 2217890 [11] включает послойную обработку почвы с формированием верхнего рыхлого, среднего уплотненного и нижнего более уплотненного слоев внутри обработанного пласта.

Для осуществления способов послойной обработки почвы нами запатентованы рабочие органы [12, 13].

Теоретико-методические принципы разработки нового технологического процесса основаны на систематизации рабочих органов. На основании анализа данного процесса и примеров технических решений систему «Рабочие органы для послойной обработки почвы» можно представить в виде четырех подсистем (см. табл.):

- I – для поверхностного рыхления;
- II – для мелкой обработки;
- III – для глубокой обработки;
- IV – для уплотнения и выравнивания.

При этом мелкая обработка почвы лапами II осуществляется после завершения релаксации и процесса снятия внутренних напряжений пласта [9], подрезанного дисками I. Далее по истечении релаксации пласта, обработанного лапами II, осуществляется глубокое рыхление почвы долотом с рыхлителями III, а затем уплотнение и выравнивание поверхности поля катками IV.

Если комбинация произведена без учета длительности релаксации пласта или нарушения последовательности функционирования подсистем, то не обеспечивается получение требуемых агротехнических показателей в связи с распылением и сгущиванием почвы перед рабочим органом, возникновением призмы волочения и технологический процесс характеризуется повышенной энергоемкостью, особенно в засушливых условиях.

Комбинация подсистем может быть реализована конструктивно на единой несущей системе почвообрабатывающего агрегата, в качестве которой выступает стойка рабочего органа или рама почвообрабатывающего агрегата. В случае совмещения, например, подсистем II и III на единой стойке рыхлитель для мелкой обработки почвы подготавливает пласт для прохода долота последующего рабочего органа.

Результатом является унифицированная конструкция по методу базового агрегата с общей и сменными частями (подсистемами).

По заданной скорости агрегата V (м/с) с учетом длительности релаксации осуществляется расстановка блоков подсистем рабочих органов в продольном направлении L (м):

$$L = V \cdot \frac{\mu}{E}, \quad (3)$$

где μ – коэффициент вязкости почвы, Па·с; E – модуль упругости почвы, Па.

Для засушливых условий в результате исследований определена длительность релаксации черноземной почвы [14], которая составляет 0,09–0,11 с. Таким образом, расстояние в продольном направлении между блоками подсистем в среднем должно составлять не менее 0,2 м.

Итак, послойная обработка почвы – это результат совершенствования дифференцированной по слоям безотвальной обработки почвы. Тенденции послойной обработки почвы возникают с внедрением стойки типа paraplow с наклоном вперед по ходу движения и в сторону, используемой в качестве рыхлящего элемента рабочего органа. Стойка типа paraplow, формируя наклонные щели, способствует улучшению качества рыхления всего обрабатываемого слоя почвы, особенно в слое между подсистемами II и III, где пласт крошится под влиянием распространяемых опережающих трещин от долота, не взаимодействуя непосредственно с режущими кромками рабочего органа.

Таким образом, режущие кромки рабочего органа в слое между подсистемами II и III не создают поверхности раздела, и крошение происходит по пути наименьшего сопротивления почвы (по М.Х. Пигулевскому) по линиям скольжения, которые имеют криволинейную форму (по В.В. Соколовскому).

Форма стойки типа paraplow [15] обычно выполняется с наклоном по ходу движения и в сторону обычно в виде прямолинейных участков ломаной линии, при неограниченном возрастании числа звеньев которой образуется кривая.

Оптимизация формы кривой также обусловлена требованием снижения металлоемкости конструкции, масса которой несколько

Таблица

Система «Рабочие органы для послойной обработки почвы»

№	Подсистема (рабочий орган)	Глубина обработки, см
I	Для поверхностного рыхления (диск)	8–10 см
II	Для мелкой обработки (лапа)	до 16 см
III	Для глубокой обработки (долото с рыхлителями)	свыше 25 см
IV	Для уплотнения и выравнивания (каток)	8–10 см

завышена в связи с размещением нескольких подсистем рабочего органа на единой стойке. Уменьшение длины кривой приводит к задаче поиска наименьшего времени перемещения (спуска) некоторой точки, расположенной на стойке типа *ragarlow*. Скорость перемещения точки A_0 в точку A_{n+1} изменяется дискретно [16] с бесконечно малым шагом (рис. 1).

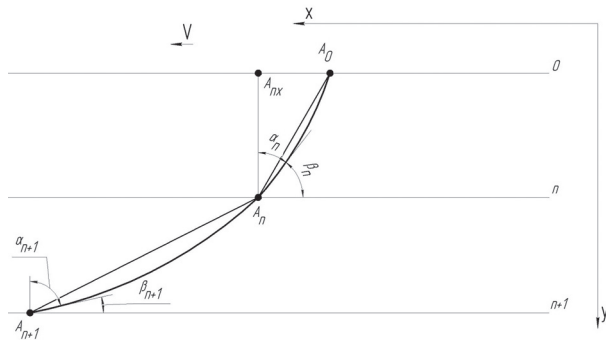


Рис. 1. Схема к определению формы криволинейной стойки типа *ragarlow* для послойной обработки почвы

Поскольку скорость зависит от плотности слоев почвы, которые дифференцированы, время перемещения точки по кратчайшей траектории не является наименьшим.

На границе раздела двух слоев наблюдается нарушение прямолинейности перемещения точки, физически заключающееся в том, что углы падения и преломления отличаются друг от друга, в результате чего траектория приобретает характер ломаной линии.

Физическая интерпретация механической задачи позволяет установить преломление прямолинейной траектории перемещения точки при различии скоростей, обусловленном дифференцированием слоев почвы при послойной обработке.

Известно, что коэффициент преломления определяется отношением скоростей излучения (электромагнитного, светового и др.) в средах с различием плотности слоев обрабатываемой среды. Из аналогии процессов перемещения точки внутри пласта почвы и электромагнитного излучения следует зависимости (4), (5) для определения скорости:

$$V = \frac{V_n}{\sin \alpha_n}. \quad (4)$$

С точки зрения физики процесса, гребень волны, двигаясь в направлении своего распространения, преодолевает расстояние A_0A_{nx} , при

этом точка пересечения его с границей слоя $0-n$ перемещается на A_0A_n .

$$\sin \alpha_n = \frac{A_0A_{nx}}{A_0A_n} = \frac{V_n}{V}. \quad (5)$$

Аналогично получим выражение для слоя $n - (n+1)$:

$$V = \frac{V_{n+1}}{\sin \alpha_{n+1}}, \quad (6)$$

где V_n, V_{n+1} – скорость перемещения в слое $0-n, n-(n+1)$, соответственно.

В результате приравнивания скорости вдоль границы раздела слоев для падающей и прошедшей волн получим выражение, эквивалентное закону Снеллиуса:

$$\frac{V_n}{\sin \alpha_n} = \frac{V_{n+1}}{\sin \alpha_{n+1}}. \quad (7)$$

Согласно закону Снеллиуса, данное отношение является постоянным:

$$\frac{\sin \alpha}{V} = \text{const}. \quad (8)$$

Из анализа рис. 1 следует:

$$\alpha + \beta = \frac{\pi}{2}, \quad (9)$$

где β – угол отклонения касательной к криволинейной траектории перемещения точки от линии уровня горизонта, град.

Выполнив некоторые преобразования, получим:

$$\text{tg } \beta = \frac{dy}{dx} = y', \quad (10)$$

$$\sin \alpha = \cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + y'^2}}. \quad (11)$$

В результате сопоставления выражений, выведенных на основании положений механики движения материальной точки, физики электромагнитного и светового излучения, получим уравнение искомой кривой, представляющее собой дифференциальное уравнение брахистохроны первого порядка:

$$y(1 + y'^2) = \text{const}. \quad (12)$$

Длина дуги брахистохроны (периметр стойки) можно определить по формуле:

$$s = D \cdot \left| \sin \frac{t}{2} \right|, \quad (13)$$

где D – диаметр производящего круга брахистохроны, представляющий проекцию длины стойки

на горизонтальную поперечную плоскость, м;
 t – параметр, определяемый взаимосвязь с физико-механическими свойствами почвы.

Результаты и их обсуждение

Пример зависимости [17] параметров и режимов работы комбинированных машин (тягового сопротивления P_T , глубины рыхления a , скорости V , ширины захвата B от физико-механических свойств почвы (твердость H) в виде взаимосвязи критериев энергетического ($P_T/H \cdot a^2$), геометрического (B/a) и механического подобия ($g \cdot a/V^2$) подсистем «рабочие органы для послонной обработки почвы», размещенных на единой несущей системе, представлен на рис. 2.

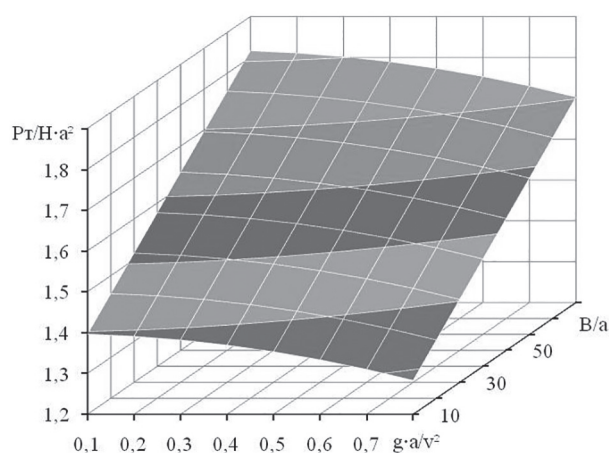


Рис. 2. Взаимосвязь критериев энергетического, геометрического и механического подобия комбинированных машин

Из анализа зависимости (рис. 2) следует, что критерий подобия ($P_T/H \cdot a^2$) уменьшается с увеличением ($g \cdot a/V^2$) при (B/a) = const, а с ростом (B/a) при ($g \cdot a/V^2$) = const возрастает, причем интенсивнее. Таким образом, энергетический критерий уменьшается интенсивнее и больше зависит от геометрии рабочих органов (B/a), чем от механического подобия.

Внедрение инновационных конструкций рабочих органов является перспективным направлением повышения эксплуатационной надежности и энергоэффективности почвообрабатывающих машин [18, 19], предупреждает возникновение преждевременного износа их механизмов и систем [20].

Использование программного комплекса «МВТУ», разработанного на кафедре «Ядерные реакторы и ядерные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана, позволяет анализировать процессы в динамических си-

стемах с помощью визуальных средств структурного моделирования [21–23].

Заключение

Таким образом, разработка технологического процесса обработки почвы в засушливых условиях юга России должна основываться на следующих принципах:

- накопление влаги внутри пласта необходимо осуществлять за счет использования термодиффузионных процессов;
- обработку почвы производить дифференцированно с различной степенью уплотнения по слоям;
- процесс осуществляется унифицированной конструкцией, разработанной по методу базового агрегата с общей и сменными частями (подсистемами);
- комбинация подсистем реализуется конструктивно на единой несущей системе по определенному принципу размещения с учетом длительности релаксации внутренних напряжений почвы;
- для повышения эксплуатационной надежности и энергоэффективности почвообрабатывающих машин используются инновационные конструкции, основанные на взаимосвязи параметров и режимов работы с физико-механическими свойствами почвы.

Литература

1. Методы оценки степени деградации сельскохозяйственных земель: научн. издание / ФГБНУ ВНИИ «Радуга». Коломна: ИП Воробьев О.М., 2015. 32 с.
2. Gurr, C.G. Movement of Water in Soil in Response to Temperature Gradients / C.G. Gurr, T.J. Marshal, J.T. Hutton // Soil Science. 1952. 74. P. 335–345.
3. Пархоменко Г.Г., Громаков А.В., Божко И.В. Влияние послонной обработки почвы на процесс термодиффузии влаги внутри пласта // Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий: сборник научных докладов Международной научно-технической конференции. М.: ФГБНУ ВИМ, 2014. С. 217–221.
4. А.с. СССР № 126311. Способ направленного использования парообразной воды атмосферы / Минаев В.С. МПК МПК 45а, 39, № 624050/30, заявл. 03.04.1959, опубл. 1960.
5. Патент РФ № 2453091. Способ обработки почвы / Конищев А.А. МПК А01 В79/02 (2006.01), № 2010150936/13, заявл. 13.12.2010, опубл. 20.06.2012.

6. А.с. СССР № 2185713 Способ обработки почвы / Шаталин В.Н., Ельцов Е.И. МПК А01 В79/00, № 2482174/30-15, заявл. 29.04.1977, опубл. 31.08.1978.
7. Патент РФ № 2158068. Способ безотвальной обработки почвы / Медведев В.И., Мазяров В.П. МПК А01В79/00, № 99105151/13, заявл. 15.03.1999, опубл. 27.10.2000.
8. А.с. СССР № 1604186 Способ обработки почвы / Смирнов В.Т., Галкин В.Д. МПК А 01 В 79/00, № 4466184, заявл. 26.07.1988, опубл. 07.11.1990.
9. А.с. СССР № 125422. Комбинированный способ основной обработки почвы и устройство для его осуществления / Цымбал А.Г., Лаврухин В.А., Зинчук П.О. МПК 45а, 39, № 609934/30, заявл. 18.10.1958, опубл. 1960.
10. Патент РФ № 2147163. Способ послойного щелевого рыхления / Таранин В.И., Щириков В.Н., Рыков В.Б., Липкович Э.И. МПК А01В79, № 99100685/13, заявл. 10.01.1999, опубл. 10.04.2000.
11. Патент РФ № 2217890. Способ образования и укладки фракций почвы и устройство для его осуществления / Богомягих В.А., Таранин В.И., Жидков Г.А. МПК А01В79, № 2001119895/13, заявл. 17.07.2001, опубл. 10.12.2003.
12. Патент на полезную модель 139415 РФ А01 В35/20, А01 В35/26. Рабочий орган для послойной безотвальной обработки почвы / Пархоменко Г.Г., Божко И.В., Громаков А.В., Камбулов С.И., Рыков В.Б., № 2013148673/13, заявл. 31.10.2013, опубл. 20.04.2014.
13. Патент на полезную модель 156896 РФ А01 В35/02. Комбинированный рабочий орган для послойной безотвальной обработки почвы / Божко И.В., Пархоменко Г.Г., Пахомов В.И., Пантюхов И.В., Камбулов С.И., Рыков В.Б., Ридный С.Д., Громаков А.В., № 2015131076/13, заявл. 16.07.2015, опубл. 20.11.2015.
14. Пархоменко, Г.Г. Обоснование параметров почвообрабатывающих машин на основании реологии / Г.Г. Пархоменко, Г.Д. Костадинов, С.А. Твердохлебов // Почвоведение агрохимия и экология. 2016. 50. № 3–4. С. 111–119.
15. Dorado, J. The effect of tillage system and use of a paraplow on weed flora in a semiarid soil from central Spain / J. Dorado, C. Lopez-Fando // Weed research. 2006. 46. P. 424–431.
16. Пархоменко, Г.Г. Обоснование параметров рабочего органа типа para-plow / Г.Г. Пархоменко, С.А. Твердохлебов // Вестник АПК Ставрополя. 2017. № 1 (25). С. 44–48.
17. Щириков, В.Н. Применение теории размерностей и подобия при определении параметров и режимов работы машин для обработки почвы / В.Н. Щириков, Г.Г. Пархоменко // Электронный научный журнал КубГАУ. – № 110 (06). – 2015 – 15 с. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2015/06/pdf/39.pdf> (дата обращения 14.02.2018).
18. Пархоменко, С.Г. Повышение энергоэффективности мобильных почвообрабатывающих агрегатов / С.Г. Пархоменко, Г.Г. Пархоменко // Инновации в сельском хозяйстве. 2016. № 3 (18). С. 40–47.
19. Пархоменко, Г.Г. Повышение эксплуатационной надежности САР почвообрабатывающих машин / Г.Г. Пархоменко, С.Г. Пархоменко // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 122. С. 87–91.
20. Пархоменко, Г.Г. Оптимизация показателей технологических процессов сельскохозяйственного производства в растениеводстве / Г.Г. Пархоменко, С.Г. Пархоменко // Хранение и переработка зерна. 2017. № 1 (209). С. 55–60.
21. Пархоменко, С.Г. Метод структурного моделирования систем автоматического регулирования эксплуатационных режимов работы почвообрабатывающих агрегатов / С.Г. Пархоменко, Г.Г. Пархоменко // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 126. С. 55–61.
22. Пархоменко, С.Г. Моделирование следящих систем почвообрабатывающих агрегатов / С.Г. Пархоменко, Г.Г. Пархоменко // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 1. С. 22–31.
23. Пархоменко, Г.С. Моделирование в программном комплексе «МВТУ» динамики мобильных сельскохозяйственных машин и нелинейных следящих систем / Г.С. Пархоменко, С.Г. Пархоменко, Г.Г. Пархоменко // Совершенствование технологий и средств механизации полеводства: межвузовский сборник трудов к 75-летию академии (г. Зерноград, АЧГАА). Зерноград. 2005. С. 86–92.

References

1. Metody ocenki stepeni degradacii sel'skohozyajstvennyh zemel' [Methods of assessment of agricultural land degradation]: nauchn. izdanie. FGBNU VNIИ «Raduga». Kolomna: IP Vorob'yov O.M. Publ., 2015. 32 p.
2. Gurr, C.G. Movement of Water in Soil in Response to Temperature Gradients / C.G. Gurr, T.J. Marshal, J.T. Hutton // Soil Science. 1952. 74. P. 335–345.
3. Parhomenko G.G., Gromakov A.V., Bozhko I.V. The effect of layer-by-layer tillage on the process of thermal diffusion of moisture inside the reservoir. Innovacionnoe razvitie APK Rossii na baze intellektual'nyh mashinnyh tekhnologij: Sbornik nauchnyh dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii [Innovative development of the agro-industrial complex of Russia on the basis of intellectual machine technologies: Collection of scientific

- reports of the International Scientific and Technical Conference]. Moscow: FGBNU VIM Publ., 2014, pp. 217–221 (in Russ.).
4. A.s. SSSR No 126311. Sposob napravlennogo ispol'zovaniya paroobraznoj vody atmosfery [Way directional use of water vapor of the atmosphere]. Minaev V.S. MPK MPK 45a, 39, No 624050/30, zayavl. 3.04.1959, opubl. 1960.
 5. Patent RF No 2453091. Sposob obrabotki pochvy [Method of soil treatment]. Konishchyov A.A. MPK A01 B79/02 (2006.01), No 2010150936/13, zayavl. 13.12.2010, opubl. 20.06.2012.
 6. A.s. SSSR No 2185713 Sposob obrabotki pochvy [Method of soil treatment]. SHatalin V.H., El'cov E.I. MPK A01 B79/00, No 2482174/30-15, zayavl. 29.04.1977, opubl. 31.08.1978.
 7. Patent RF No 2158068. Sposob bezotval'noj obrabotki pochvy [Method of tilling]. Medvedev V.I., Mazyarov V.P. MPK A01B79/00, No 99105151/13, zayavl. 15.03.1999, opubl. 27.10.2000.
 8. A.s. SSSR No 1604186 Sposob obrabotki pochvy [Method of soil treatment]. Smirnov V.T., Galkin V.D. MPK A 01 V 79/00, No 4466184, zayavl. 26.07.1988, opubl. 07.11.1990.
 9. A.s. SSSR No 125422. Kombinirovannyj sposob osnovnoj obrabotki pochvy i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya [The combined method of the main tillage and the device for its implementation]. Cymbal A.G., Lavruhin V.A., Zinchuk P.O. MPK 45a, 39, No 609934/30, zayavl. 18.10.1958, opubl. 1960.
 10. Patent RF No 2147163. Sposob poslojnogo shchelevogo ryhleniya [Method of layer-by-layer slot loosening]. Taranin V.I., SHCHirov V.N., Rykov V.B., Lipkovich E.H.I. MPK A01B79, No 99100685/13, zayavl. 10.01.1999, opubl. 10.04.2000.
 11. Patent RF No 2217890. Sposob obrazovaniya i układki frakcij pochvy i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya [Method of formation and laying of soil fractions and device for its implementation]. Bogomyagkih V.A., Taranin V.I., ZHidkov G.A. MPK A01B79, No 2001119895/13, zayavl. 17.07.2001, opubl. 10.12.2003.
 12. Patent na poleznuyu model' 139415 RF A01 V35/20, A01 V35/26. Rabochij organ dlya poslojnoj bezotval'noj obrabotki pochvy [Working body for layer-by-layer soilless tillage]. G.G. Parhomenko, I.V. Bozhko, A.V. Gromakov, S.I. Kambulov, V.B. Rykov. GNU SKNIIMEHSHKH Rossel'hozokademii. Zayavl. 31.10.2013. Opubl. 20.04.2014. Byul. No 11.
 13. Patent na poleznuyu model' 156896 RF A01 V35/02. Kombinirovannyj rabochij organ dlya poslojnoj bezotval'noj obrabotki pochvy [Combined working body for layer-by-layer soilless tillage]. I.V. Bozhko, G.G. Parhomenko, V.I. Pahomov, I.V. Pantyuhov, S.I. Kambulov, V.B. Rykov, S.D. Ridnyj, A.V. Gromakov. FGBNU SKNIIMEHSHKH. Zayavl. 16.07.2015. Opubl. 20.11.2015. Byul. No 32.
 14. Parhomenko G.G., Kostadinov G.D., Tverdohlebov S.A. Justification of the parameters of tillage machines on the basis of rheology. Pochvoznanie agrohimiya i ehkologiya. 2016. 50. No 3–4, pp. 111–119 (in Russ.).
 15. Dorado J. The effect of tillage system and use of a paraplow on weed flora in a semiarid soil from central Spain. J. Dorado, C. Lopez-Fando. Weed research. 2006. 46. P. 424–431.
 16. Parhomenko G.G., Tverdohlebov S.A. Justification of the parameters of the working body of para-plow type. Vestnik APK Stavropol'ya. 2017. No 1 (25), pp. 44–48 (in Russ.).
 17. SHCHirov V.N., Parhomenko G.G. Application of the theory of dimensions and similarity in determining the parameters and modes of operation of machines for tillage. EHlektronnyj nauchnyj zhurnal KubGAU. No 110(06). 2015. 15 p. (in Russ.) URL: <http://ej.kubagro.ru/2015/06/pdf/39.pdf> (data obrashcheniya 14.02.2018).
 18. Parhomenko S.G., Parhomenko G.G. Improving the energy efficiency of mobile tillage machines. Innovacii v sel'skom hozyajstve. 2016. No 3 (18), pp. 40–47 (in Russ.).
 19. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Improving the operational reliability of automatic control system of tillage machines. Trudy GOSNITI. 2016. Vol. 122, pp. 87–91 (in Russ.).
 20. Parhomenko G.G., Parhomenko S.G. Optimization of indicators of technological processes of agricultural production in crop production. Hranenie i pererabotka zerna. 2017. No 1(209), pp. 55–60 (in Russ.).
 21. Parhomenko S.G., Parhomenko G.G. The method of structural modeling of automatic control systems of operational modes of operation of soil-cultivating units. Trudy GOSNITI. 2017. Vol. 126, pp. 55–61 (in Russ.).
 22. Parhomenko S.G., Parhomenko G.G. Simulation of tracking systems of tillage units. Traktory i sel'hozmashiny. 2017. No 1, pp. 22–31 (in Russ.).
 23. Parhomenko G.S., Parhomenko S.G., Parhomenko G.G. Modeling of the dynamics of mobile agricultural machines and nonlinear tracking systems in the software complex “MVTU”. Sovershenstvovanie tekhnologij i sredstv mekhanizacii polevodstva: mezhevuzovskij sbornik trudov k 75-letiyu akademii (g. Zernograd, ACHGAA) [Improvement of technologies and means of field mechanization: interuniversity collection of works for the 75th anniversary of the Academy]. Zernograd. 2005, pp. 86–92 (in Russ.).

ОБОСНОВАНИЕ ШИРИНЫ ВЫСЫПНОГО ОТВЕРСТИЯ ШНЕКОВОГО ТРАНСПОРТЕРА-РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ

JUSTIFICATION OF THE WIDTH OF THE OUTLET OF THE SCREW CONVEYOR AND DISTRIBUTOR

И.Е. БЫЧКОВ

А.И. КУПРЕНКО, д.т.н.

Т.В. БЫЧКОВА, к.п.н.

Х.М. ИСАЕВ, к.э.н.

Брянский государственный аграрный университет,
Брянская область, с. Кокино, Россия, kupreenkoai@mail.ru

I.E. BYCHKOV

A.I. KUPREENKO, DSc in Engineering

T.V. BYCHKOVA, PhD in Pedagogics

H.M. ISAEV, PhD in Economics

Bryansk State Agricultural Academy, Bryansk region, Kokino,
Russia, kupreenkoai@mail.ru

Предметом исследования является шнековый транспортер-распределитель зерна с высыпным отверстием вдоль его кожуха. Такая конструкция устраняет необходимость разравнивания зерновой насыпи, перемещения транспортера или использования поворотного лотка для равномерного распределения выгружаемого зерна. Целью исследования является нахождение зависимости ширины высыпного отверстия от параметров транспортера-распределителя. Изготовлена лабораторная установка и проведены исследования по истечению зерна пшеницы через высыпное отверстие различной ширины. Лабораторная установка представляет собой емкость из пластиковой прямоугольной трубы, открытой сверху. В нее вставлены на равном расстоянии поперечные мембраны. Они делят всю емкость по ее длине на отсеки. В днище трубы сделано высыпное отверстие в виде прорези постоянной ширины. Высыпное отверстие закрыто снизу выдвигающейся в бок заслонкой. Под высыпным отверстием установили лотки, каждый под своим отсеком, в которые высыпается зерно. Вынув задвижку, с помощью хронометражной видеозаписи засекали время, за которое происходило полное высыпание зерна через высыпное отверстие. Эксперимент проводили при различной ширине высыпного отверстия и при разной массе зерна в отсеках. Ширину высыпного отверстия меняли от 7 до 13 мм. Установлено, что в условиях ограниченной высоты столба зерна над отверстием скорость истечения через высыпное отверстие не зависит от высоты столба зерна над отверстием. Построена зависимость единичного потока зерна от ширины высыпного отверстия. При ширине высыпного отверстия, равной 7 мм, истечения зерна не происходит. Получено выражение, описывающее форму высыпного отверстия в зависимости от конструктивно-режимных параметров шнекового транспортера-распределителя. Построен график, демонстрирующий форму высыпного отверстия при заданных конструктивно-режимных параметрах шнекового транспортера-распределителя.

Ключевые слова: шнековый транспортер-распределитель, заполнение емкости, истечение зерна, форма высыпного отверстия.

The subject of the research is a screw conveyor-distributor of grain with an empty hole along its casing. This design eliminates the need for leveling the grain mound, moving the conveyor or using a rotary tray to evenly distribute the unloaded grain. The purpose of the study is to find the dependence of the width of the outlet hole on the parameters of the conveyor-distributor. A laboratory installation was made and studies were conducted on the expiration of wheat grain through a drain hole of various widths. Laboratory installation is a container made of plastic rectangular pipe open at the top. The transverse membranes are inserted at an equal distance into it. They divide the entire capacity along its length compartments. In the bottom of the pipe, a hole in the form of a slot of constant width is made. Eruptive hole is closed from the bottom of the side retractable flap. Under the discharge opening, trays were installed, each under its own compartment, into which the grain is poured. Having removed the valve, with the help of time-lapse videotape, the time was taken during which the grain was completely poured through the empty hole. An experiment with different width of the outlet holes and with different mass of grain in the compartments was conducted. The width of the hole was changed from 7 to 13 mm. It has been established that under conditions of limited height of the grain column above the hole, the flow rate through the drain hole does not depend on the height of the grain column above the hole. The dependence of a single grain flow on the width of an outlet is constructed. When the width of the outlet hole is 7 mm the outflow of grain does not occur. An expression is obtained that describes the shape of the outlet hole, depending on the design-mode parameters of the screw conveyor. A graph showing the shape of the outlet hole with the given design-mode parameters of the screw conveyor was constructed.

Keywords: screw conveyor and distributor, capacity filling, grain outflow, dump hole shape.

Введение

Для более полного заполнения емкостей для хранения зерна за счет выравнивания насыпи часто требуется применение ручного труда [1, 2]. Это увеличивает время простоя под грузовыми операциями, в связи с чем растут трудозатраты. Обычный шнековый транспортер в этом случае необходимо передвигать или использовать направляющие поворотные лотки.

В ряде работ [3, 4, 5] предложена конструкция шнекового транспортера-распределителя, обеспечивающего равномерное распределение зерна по всей длине заполняемой емкости за счет продольной прорези (высыпного отверстия) в нижней части кожуха транспортера для выгрузки зерна по всей его длине. Получена форма высыпного отверстия в виде трапеции с расширениями в начале и в конце высыпного отверстия (рис. 1).

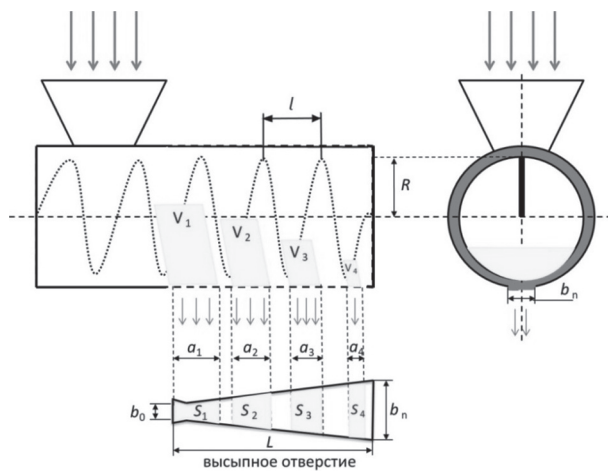


Рис. 1. Схема работы шнекового транспортера-распределителя и форма высыпного отверстия

В работах [3, 5] мы пришли к выводу, что площади S_1, S_2, \dots, S_n должны быть равны между собой с учетом коэффициентов расхода зерна k через высыпное отверстие для обеспечения равномерного распределения зерна вдоль всей длины L высыпного отверстия и, соответственно, обеспечения постоянного значения потока P (P – количество зерна объемом V , прошедшего за единицу времени t через площадь S)

$$P = k_1 S_1 = k_2 S_2 = \dots = k_n S_n = \text{const.} \quad (1)$$

Цель исследования

Определение коэффициентов расхода зерна k через высыпное отверстие и уточнение его формы.

Материалы, методы исследования и их обсуждение

Для определения коэффициентов расхода зерна k через высыпное отверстие был проведен лабораторный эксперимент.

В емкость из пластиковой прямоугольной трубы (рис. 2), открытой сверху, вставили на равном расстоянии поперечные мембраны (разделительные пластины). Тем самым всю емкость разделили по всей длине на семь отсеков шириной 60 мм. В днище трубы сделали высыпное отверстие в виде прорези постоянной ширины. Высыпное отверстие закрыли снизу выдвигающейся в бок заслонкой так, чтобы можно было быстро открыть и закрыть отверстие, а также для изменения его ширины. При закрытом высыпном отверстии засыпали зерно пшеницы одинаковым объемом и массой m в каждый из отсеков. Под высыпным отверстием установили примыкающие друг к другу лотки, каждый под своим отсеком, в которые будет высыпаться зерно. Вынув задвижку, с помощью хронометражной видеозаписи засекали время, за которое происходило полное высыпание зерна через высыпное отверстие.

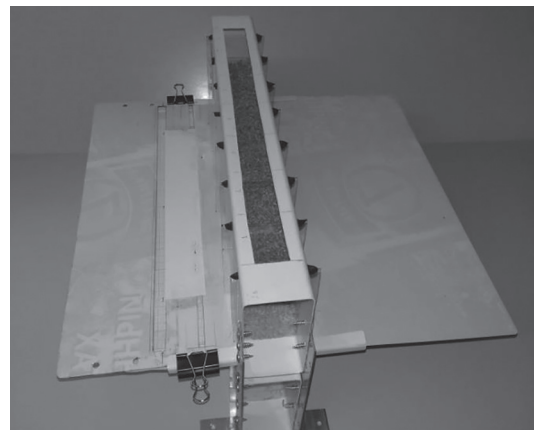


Рис. 2. Лабораторная установка по определению коэффициентов расхода зерна

Проводили эксперимент при следующих условиях:

– при постоянной ширине высыпного отверстия b засыпали заранее известные массы зерна m и измеряли время t высыпания из каждого отсека;

– меняли ширину высыпного отверстия b и повторяли эксперимент.

Ширину высыпного отверстия b в эксперименте меняли от 7 до 13 мм.

Далее известный объем зерна из каждого лотка делили на площадь высыпного отверстия, и на время истечения зерна через него. Тем самым находили значения единичного потока dP при определенной ширине прорези b . Зная P и S , из формулы (1) определяются значения коэффициентов расхода k .

Проведя эксперимент по определению коэффициентов проходимости k зерна через высыпное отверстие на каждом участке, мы получили следующие результаты:

– в условиях ограниченной высоты столба зерна над отверстием (в нашем случае 110 мм), скорость истечения через высыпное отверстие и, соответственно, поток P , не зависят от высоты столба зерна над отверстием;

– определено время высыпания t и поток P при различных значениях ширины высыпного отверстия b . Построена зависимость единичного потока dP от b (рис. 3);

– установлено, что коэффициент расхода k зерна через высыпное отверстие равен единичному потоку dP , который зависит от ширины высыпного отверстия b ;

– при ширине высыпного отверстия равной 7 мм истечения зерна не происходит.

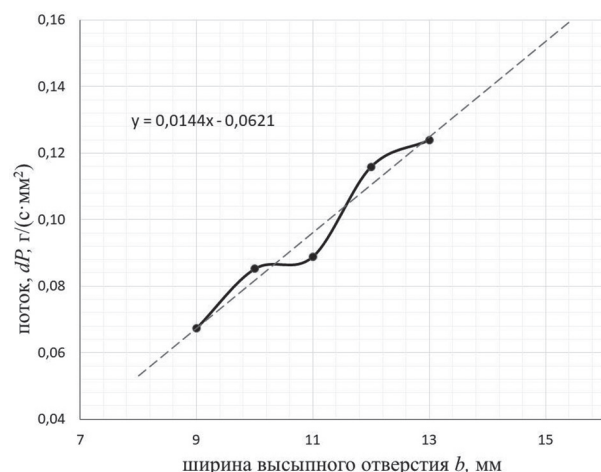


Рис. 3. Зависимость единичного потока dP от ширины высыпного отверстия b

Зависимость единичного потока dP от ширины высыпного отверстия b в результате аппроксимации экспериментальной кривой на рис. 3 рассчитывается по формуле:

$$dP = 0,0144b - 0,0621. \quad (2)$$

Из выражения (2) можно определить поток зерна, который будет проходить через высыпное отверстие шириной b на любом его участке от 0 до L .

Найдем зависимость ширины высыпного отверстия b от его длины a .

Принимая допущение, что площадь соприкосновения зерна с высыпным отверстием $S = a \cdot b$ (где a – длина загруженного высыпного отверстия, ограниченного межвитковым пространством шнека, b – средняя ширина высыпного отверстия в пределах a) находим поток P через эту площадь:

$$P = SdP = abdP. \quad (3)$$

Так как поток P величина постоянная ($P = const$), из (3) находим зависимость b от a :

$$b = P / (adP)$$

или с учетом выражения (2)

$$b = \frac{P}{a(0,0144b - 0,0621)}. \quad (4)$$

После преобразования выражения (4) получим квадратное уравнение:

$$0,0144b^2 - 0,0621b - \frac{P}{a} = 0. \quad (5)$$

Решением уравнения (5) будет

$$0,0144b^2 - 0,0621b - \frac{P}{a} = 0;$$

$$b = \frac{0,0621 + \sqrt{0,0621^2 + 4 \cdot 0,0144 \cdot P / a}}{2 \cdot 0,0144}. \quad (6)$$

Значение P вычисляется по формуле:

$$P = \rho_3 f \pi R^2 l^2 n / (60L), \quad (7)$$

где ρ_3 – объемная плотность зерна, $\rho_3 = 750 \dots 800$ г/дм³; f – коэффициент заполнения межвиткового пространства шнека, $f = 0,1 \dots 0,4$; R – радиус шнека, $R = 110$ мм; l – шаг шнека, $l = 65$ мм; n – частота вращения шнека, $n = 309$ мин⁻¹; L – длина высыпного отверстия, $L = 800$ мм.

Подставив выражение (7) в формулу (6), получим уравнение для нахождения ширины высыпного отверстия:

$$b = \frac{0,0621 + \sqrt{0,0621^2 + 4 \cdot 0,0144 \cdot \frac{\rho_3 f \pi R^2 l^2 n}{60 a L}}}{2 \cdot 0,0144}. \quad (8)$$

Предположив, что значение a меняется от величины шага шнека l до 1 мм (см. рис. 1), методом компьютерного моделирования [6] по уравнению (8) построим зависимость $b = b(a)$ при постоянном потоке $P = 80$ г/с (рис. 4).

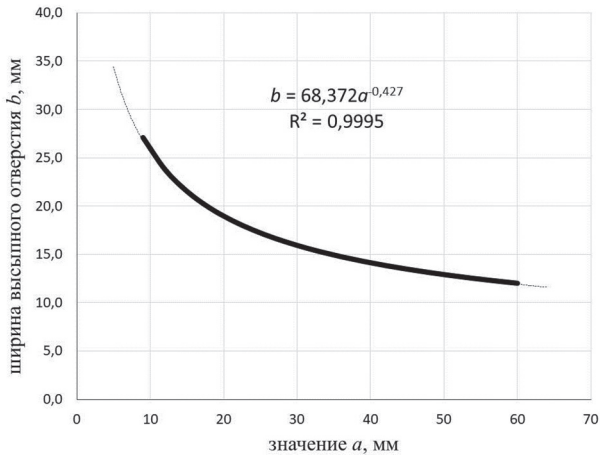


Рис. 4. Зависимость ширины высыпного отверстия $b = b(a)$

Линия тренда, практически совпадающая с графиком на рис. 4, описывает степенную зависимость ширины высыпного отверстия от значения a в виде:

$$b = 68,372a^{(-0,427)}. \quad (9)$$

Так как линия тренда с достаточно высокой точностью повторяет график функции (коэффициент детерминации $R^2 = 0,9995$), формулы (8) и (9) являются тождественными при постоянном потоке $P = 80$ г/с. Очевидно, что при новых значениях P также будет построена функция и найдена описывающая ее степенная зависимость. Производительность транспортера будет равна произведению P на число межвитковых пространств в пределах высыпного отверстия, которое определяется отношением L/l .

График зависимости $b = b(a)$, изображенный на рис. 4, описывает форму высыпного отверстия. Для визуализации высыпного отверстия (с учетом его расположения на рис. 1) преобразуем график функциональной зависимости (9) на рис. 4 путем его сжатия, симметрии относительно координатных осей и параллельного переноса. В результате получаем уравнение формы высыпного отверстия при значениях a от l до 1 и $P = 80$ г/с в виде (рис. 5):

$$b = \pm 34,186(ma + L)^{-0,427}, \quad (10)$$

где $m = L/l$ – коэффициент растяжения графика вдоль оси абсцисс.

Для определения максимально возможной площади высыпного отверстия в межвитковых пространствах по длине транспортера разделим график на рис. 5 по оси L на равное число частей согласно значению m . Виток шнека, расположенный в начале высыпного отверстия, принимаем за нулевой. Ширина высыпного отверстия напротив нулевого витка будет равна значению b при $L = 0$ (рис. 5). Тогда ширина высыпного отверстия напротив первого по ходу витка будет равна значению b в первом сечении графика на рис. 5. Ширина высыпного отверстия напротив второго по ходу витка будет равна значению b во втором сечении графика и т.д. Зная начальную и конечную ширину высыпного отверстия в конкретном межвитковом пространстве, определяем максимально возможную площадь высыпного отверстия.

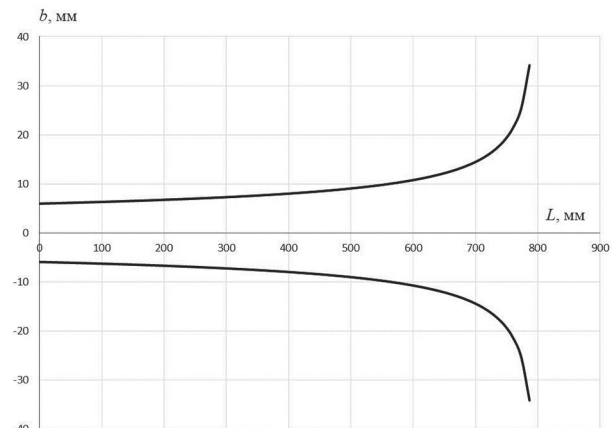


Рис. 5. Форма высыпного отверстия

На практике для обеспечения начального равномерного распределения зерна ширина высыпного отверстия под нулевым витком согласно рис. 1 должна быть несколько увеличена из-за параболической траектории падения высыпающегося зерна.

Выводы

В ходе исследования нами получено выражение (8), определяющее ширину высыпного отверстия. График зависимости $b = b(a)$, изображенный на рис. 5, демонстрирует форму высыпного отверстия при заданных конструктивно-режимных параметрах шнекового транспортера-распределителя.

Дальнейшим направлением исследований является экспериментальная проверка полученной формы высыпного отверстия и установление возможно еще не выявленных кон-

структивно-режимных параметров шнекового транспортера-распределителя, обеспечивающих равномерное распределение зерна по всей длине высыпного отверстия.

Литература

1. Мазько Н.Н. К вопросу об исследованиях закономерностей истечения сыпучих материалов из бункеров // Тезисы докл. XXX межвузовской науч. конф. студентов и аспирантов. Самара: СамГАПС, 2003. С. 154–155.
2. Мазько Н.Н. Перспективные направления исследований вопросов функционирования емкостей для сыпучих материалов // Дни студенческой науки. Сб. науч. трудов студентов и аспирантов. Выпуск 7. Самара: СамГАПС, 2006. С. 45–46.
3. Бычков И.Е., Купреенко А.И., Исаев Х.М. К обоснованию конструктивно-режимных параметров шнекового транспортера-распределителя // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. Сборник научных работ. Брянск: Издательство Брянского ГАУ, 2016. С. 56–62.
4. Пат. на полезную модель 169064 РФ, МКИЗ В65G 65/32. Устройство для загрузки емкости сыпучим материалом / А.И. Купреенко, И.Е. Бычков, Х.М. Исаев. № 2016128176; заявлено 11.07.16; опубл. 02.03.17, Бюл. № 7.
5. Бычков И.Е. К обоснованию формы высыпного отверстия шнекового транспортера-распределителя // Science, Technology and Life – 2017: Proceedings of articles the IV International Scientific conference. Czech Republic, Karlovy Vary – Russia, Moscow, Decemder 24–25, 2017. 2018. S. 18–28.
6. Бычкова Т.В. Математика: учебное пособие: Изд-во Брянского ГАУ, 2017. 58 с.

References

1. Maz'ko N.N. Studies of the flow patterns of bulk materials from bunkers. Tezisy dokl. HKHKH mezhvuzovskoj nauch. konf. studentov i aspirantov [Abstracts XXX interuniversity scientific. conf. of undergraduate and graduate students]. Samara: SamGAPS Publ., 2003, pp. 154–155 (in Russ.).
2. Maz'ko N.N. Promising areas of research on the functioning of bulk materials. Dni studencheskoj nauki. Sb. nauch. trudov studentov i aspirantov. [Days of student science. Collection of scientific works of students and postgraduates] Vypusk 7. Samara: SamGAPS Publ., 2006, pp. 45–46 (in Russ.).
3. Bychkov I.E., Kupreenko A.I., Isaev H.M. Justification of the design-mode parameters of a screw conveyor-distributor. Konstruirovanie, ispol'zovanie i nadezhnost' mashin sel'skohozyajstvennogo naznacheniya. Sbornik nauchnyh rabot [Design, use and reliability of agricultural machinery. Collection of scientific papers]. Bryansk: Izdatel'stvo Bryanskogo GAU Publ., 2016, pp. 56–62 (in Russ.).
4. Pat. na poleznuyu model' 169064 RF, MKI3 B65G 65/32. Ustrojstvo dlya zagruzki emkosti sypuchim materialom [Bulk material loading device]. A.I. Kupreenko, I.E. Bychkov, H.M. Isaev. No 2016128176; zayavleno 11.07.16; opubl. 02.03.17, Byul. No 7.
5. Bychkov I.E. Substantiation of the shape of the outlet hole of the screw conveyor-distributor. Science, Technology and Life – 2017: Proceedings of articles the IV International Scientific conference. Czech Republic, Karlovy Vary – Russia, Moscow, Decemder 24–25, 2017. 2018. S. 18–28.
6. Bychkova T.V. Matematika [Mathematics]: uchebnoe posobie. Izd-vo Bryanskogo GAU Publ., 2017. 58 p.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СРЕДСТВАХ

VISUALIZATION OF THE RESULTS OF MATHEMATICAL MODELING OF DYNAMIC PROCESSES IN MOBILE POWER FACILITIES

А.Н. КУЗНЕЦОВ, к.т.н.
О.И. ПОЛИВАЕВ, д.т.н.
А.В. ЛОЩЕНКО

Воронежский государственный аграрный университет
им. императора Петра I, Воронеж, Россия,
kuz-basss@yandex.ru

A.N. KUZNECOV, PhD in Engineering
O.I. POLIVAEV, DSc in Engineering
A.V. LOSHCENKO

Voronezh State Agricultural University, Voronezh, Russia,
kuz-basss@yandex.ru

Для анализа, оценки и демонстрации поведения созданных математических моделей сложных динамических объектов разработчикам зачастую приходится пользоваться графическими материалами, которые весьма сложны и неинформативны. Современные программные математические пакеты позволяют не только производить решение систем дифференциальных уравнений, описывающих поведение объектов, но и создавать анимированные представления этих процессов. Для этого в среде MathCAD имеется системная переменная FRAME, значение которой может изменяться от 0 до 999. Данная переменная позволяет поочередно обращаться к строкам сохраненной матрицы численного решения систем дифференциальных уравнений и отображать новые состояния элементов анализируемой динамической системы с одновременной кадровой записью данных отображений. Для представления реальных объектов моделирования на двумерных графиках, из которых формируется анимация, рисуются различные геометрические примитивы – квадраты, прямоугольники и окружности с различным количеством степеней свободы. Для создания матриц представления данных примитивов формируются прототипы функций. Геометрические параметры или положение матриц представления жестко связываются с элементами в строке матрицы численного решения, на которую указывает системная переменная FRAME. Результатом применения данной переменной является анимированное представление, которое наглядно демонстрирует поведение объектов и позволяет быстро выявить ошибки, допущенные при моделировании. В данной статье на примере анализа поведения конструктивных элементов мобильного энергетического средства (МЭС) при переезде единичной неровности заданной формы показана методика создания анимации описанного процесса. Также рассмотрен вопрос нахождения численного решения систем дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты 4-го порядка в математическом пакете MathCAD.

Ключевые слова: математическое моделирование, визуализация, динамический процесс, колебания.

To analyze, evaluate and demonstrate the behavior of created mathematical models of complex dynamic objects, developers often have to use graphic materials, which are very complex and uninformative. Modern software mathematical packages allow not only to solve systems of differential equations describing the behavior of objects but also to create animated representations of these processes. To do this, the MathCAD environment has a system variable FRAME, the value of which can vary from 0 to 999. This variable allows to alternately refer to the lines of the stored matrix of the numerical solution of systems of differential equations and display the new states of the elements of the analyzed dynamic system, with a simultaneous time-lapse recording of these displays. To represent real modeling objects on two-dimensional graphs, from which the animation is formed, various geometric primitives are drawn: squares, rectangles, and circles with different degrees of freedom. Function prototypes are formed to create matrices for representing these primitives. The geometric parameters or the position of the representation matrices are rigidly associated with the elements in the row of the numerical solution matrix pointed to by the FRAME system variable. The result of using this variable is an animated representation that demonstrates the behavior of objects and allows you to quickly identify errors made in the simulation. In this article, on the example of the analysis of the behavior of the structural elements of the mobile power facilities when moving through a single roughness of a given shape, the technique of creating an animation of the described process is shown. The problem of finding a numerical solution of systems of differential equations by the Runge-Kutta method of the 4th order in MathCAD mathematical package is also considered.

Keywords: mathematical modeling, visualization, dynamic process, oscillations.

Введение

Зачастую при анализе поведения сложных систем, описываемых математическими моделями, результаты моделирования представляются в виде графиков. При этом, когда речь идет о взаимных перемещениях нескольких узлов, как, например, при моделировании процесса движения МЭС по неровной поверхности, информация, представленная в графической форме, может быть весьма сложной к пониманию и оценке [8, 9]. Для примера, на рис. 1 представлены результаты моделирования вертикальных колебаний мостов, остова и подрессоренной части подвески сиденья МЭС при переезде единичной неровности, форма которой описывается следующим уравнением:

$$q(x) = \frac{q_{\max}}{2} \cdot \left(1 - \cos\left(2\pi \frac{x - \Delta x}{l} \right) \right) \times (\theta(x - \Delta x) - \theta(x - \Delta x - l)), \quad (1)$$

где q_{\max} – амплитудное значение высоты единичной неровности, м; Δx – расстояние от нулевой точки до начала единичной неровности, м; l – длина единичной неровности, м; $\theta(x)$ – функция Хэвисайда.

По внешнему виду представленных на рис. 1 кривых достаточно сложно определить, насколько точно математическая модель описывает поведение реальных объектов (элементов конструкции трактора). Визуальный анализ данных графиков не позволяет сразу выявить ошибки, допущенные при моделировании. Для подтверждения адекватности разработанной модели, как правило, требуется длительные и детальные исследования.

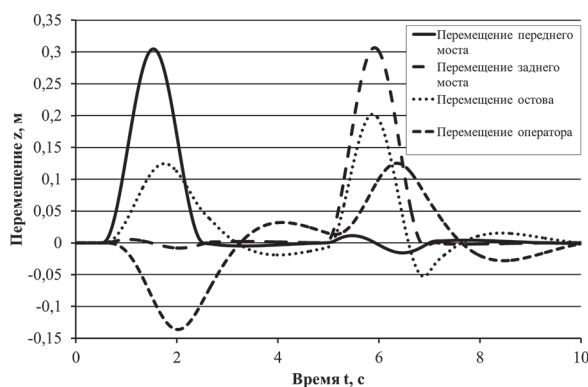


Рис. 1. Результаты моделирования вертикальных колебаний элементов конструкции МЭС

Еще более сложным становится взаимный анализ изменения поведения подобных систем при корректировании входных данных, например скорости переезда препятствия, жесткости и демпфирования упругих элементов, массы и моментов инерции узлов и т.д.

Возникает необходимость применения более гибкого инструмента, позволяющего с минимальными затратами времени оценить адекватность новой математической модели поведения какой-либо динамической системы. Одним из наиболее более информативных способов отображения результатов моделирования является создание анимации процессов, происходящих с течением времени.

Методика формирования анимированных представлений

Одним из наиболее удобных инструментов для создания анимации сложных процессов является программный модуль MathCAD [1, 5, 7].

В качестве примера разберем методику создания анимированного представления процесса переезда автотракторным средством единичного препятствия, описываемого формулой (1).

Первоначально создается математическая модель передачи колебаний от неровностей грунта на остов МЭС.

В предлагаемую математическую модель вводим следующие ограничения:

- 1) колебания переднего и заднего мостов независимы друг от друга;
- 2) угловые перемещения корпусов мостов и подвески сиденья минимальны, и ими можно пренебречь;
- 3) характеристики упругих и демпфирующих элементов шин, подвески и подрессоренного сиденья линейны;
- 4) характеристики и параметры шин и подвески правых и левых колес одинаковы;
- 5) угловыми колебаниями переднего и заднего мостов, а также подвески сиденья пренебрегаем;
- 6) высота неровностей под правым и левым колесом одинакова;
- 7) неподдресоренные массы сосредоточены в центре колес;
- 8) изменением геометрической длины плеча любой действующей на остов силы при его угловых перемещениях пренебрегаем;
- 9) движение трактора прямолинейное.

На основании принятых допущений формируем динамическую модель трактора при передвижении по неровностям, представленную на рис. 2.

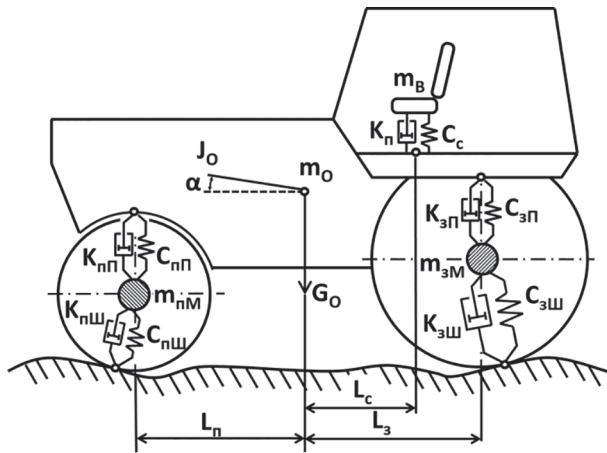


Рис. 2. Динамическая модель МЭС при движении по неровностям грунта

На рисунке обозначено:

m_0 – масса поддресоренной части остова МЭС, кг;

$m_{нМ}$ – масса поддресоренной части переднего моста МЭС, кг;

$m_{зМ}$ – масса поддресоренной части заднего моста МЭС, кг;

$m_Б$ – масса поддресоренной части подвески сиденья совместно с водителем, кг;

J_0 – момент инерции остова МЭС, кг·м²;

$K_{нш}$ – коэффициент радиального демпфирования передних шин, кг·с⁻¹;

$K_{зш}$ – коэффициент радиального демпфирования задних шин, кг·с⁻¹;

$K_{нп}$ – коэффициент демпфирования передней подвески, кг·с⁻¹;

$K_{зп}$ – коэффициент демпфирования задней подвески, кг·с⁻¹;

K_C – коэффициент демпфирования подвески сиденья, кг·с⁻¹;

$C_{нш}$ – коэффициент радиальной жесткости передних шин, кг·с⁻²;

$C_{зш}$ – коэффициент радиальной жесткости задних шин, кг·с⁻²;

$C_{нп}$ – коэффициент жесткости передней подвески, кг·с⁻²;

$C_{зп}$ – коэффициент жесткости задней подвески, кг·с⁻²;

C_C – коэффициент жесткости подвески сиденья, кг·с⁻²;

Для формирования дифференциальных уравнений, которые позволят описать данную

динамическую модель, произведем анализ сил, действующих на каждый компонент с массой [6] (рис. 3). На рис. 3 ввиду чрезмерной простоты не показана единственная сила, действующая на поддресоренную часть подвески сиденья с водителем.

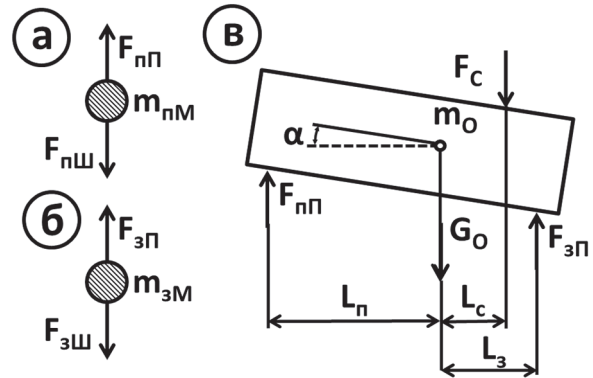


Рис. 3. Схемы сил, действующих на основные элементы конструкции МЭС:

a – силы, действующие на передний мост;

б – силы, действующие на задний мост;

в – силы, действующие на остова трактора

На рисунке обозначено:

$F_{нш}$ – равнодействующая от сил упругости и демпфирования, действующая на передний мост со стороны шин, Н

$$F_{нш} = K_{нш} \cdot \left(\frac{dq(v \cdot t)}{dt} - \frac{dZ_{нМ}}{dt} \right) + C_{нш} \cdot (q(v \cdot t) - Z_{нМ}); \quad (2)$$

$F_{зш}$ – равнодействующая от сил упругости и демпфирования, действующая на задний мост со стороны шин, Н

$$F_{зш} = K_{зш} \cdot \left(\frac{dq(v \cdot t - (L_n + L_з))}{dt} - \frac{dZ_{зМ}}{dt} \right) + C_{зш} \cdot (q(v \cdot t - (L_n + L_з)) - Z_{зМ}); \quad (3)$$

$F_{нп}$ – равнодействующая от сил упругости и демпфирования, действующая на передний мост и остова со стороны подвески, Н

$$F_{нп} = K_{нп} \cdot \left(\frac{dZ_{нМ}}{dt} - \frac{dZ_0}{dt} + \frac{d\alpha}{dt} \cdot L_n \cdot \cos(\alpha) \right) + C_{нп} \cdot (Z_{нМ} - Z_0 + L_n \cdot \text{tg}(\alpha)); \quad (4)$$

$F_{зп}$ – равнодействующая от сил упругости и демпфирования, действующая на задний мост и остова со стороны подвески, Н;

$$F_{3\Pi} = K_{3\Pi} \cdot \left(\frac{dZ_{3M}}{dt} - \frac{dZ_O}{dt} - \frac{d\alpha}{dt} \cdot L_3 \cdot \cos(\alpha) \right) + C_{3\Pi} \cdot (Z_{3M} - Z_O - L_3 \cdot \operatorname{tg}(\alpha)); \quad (5)$$

F_C – равнодействующая от сил упругости и демпфирования, действующая на сиденье с водителем и остов со стороны подвески сиденья, Н

$$F_C = K_C \cdot \left(\frac{dZ_O}{dt} + \frac{d\alpha}{dt} \cdot L_c \cdot \cos(\alpha) - \frac{dZ_B}{dt} \right) + C_C \cdot (Z_O + L_c \cdot \operatorname{tg}(\alpha) - Z_B), \quad (6)$$

где $Z_{\text{нМ}}$ – вертикальная координата положения центра масс переднего моста, м; Z_{3M} – вертикальная координата положения центра масс заднего моста, м; Z_O – вертикальная координата положения центра масс остова, м; α_0 – угловая координата положения остова, рад; $L_{\text{п}}$, L_3 , L_c – плечи соответствующих сил, м.

Следует заметить, что каждая из представленных сил зависит от входящих в расчетную формулу вертикальных компонент скоростей и перемещений, а также углов и угловых скоростей, которые, по сути, являются аргументами в данных формулах. В среде MathCAD данные аргументы обязательно необходимо записывать [1, 2], но в нашем случае мы их не указываем с целью снижения громоздкости отображения расчетных зависимостей.

В результате анализа представленных на рис. 3 схем можем получить 4-массовую математическую модель колебаний элементов конструкции МЭС:

$$\begin{cases} m_{\text{нМ}} \cdot \frac{d^2 Z_{\text{нМ}}}{dt^2} = F_{\text{нШ}} - F_{\text{нП}}, \\ m_{3M} \cdot \frac{d^2 Z_{3M}}{dt^2} = F_{3Ш} - F_{3\Pi}, \\ m_O \cdot \frac{d^2 Z_O}{dt^2} = F_{\text{нП}} + F_{3\Pi} - F_C, \\ J_O \cdot \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = F_{3\Pi} \cdot L_3 - F_{\text{нП}} \cdot L_{\text{п}} - F_C \cdot L_c, \\ m_B \cdot \frac{d^2 Z_B}{dt^2} = F_C. \end{cases} \quad (7)$$

Для нахождения решения подобной системы зачастую применяются встроенные функции численного расчета систем дифференциальных уравнений, такие как *odesolve*, *rkfixed*, *rkadapt*, *bulstoer*, *stiff* и др. [2, 5, 7].

Разберем алгоритм решение полученной системы применением встроенной функции *rkfixed* методом Рунге – Кутта 4-го порядка [3].

1. Задаем вектор начальных условий. В нашем случае примем:

$$\text{in} := (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T, \quad (8)$$

in_0 – вертикальное перемещение переднего моста;

in_1 – скорость вертикального перемещения переднего моста;

in_2 – вертикальное перемещение заднего моста;

in_3 – скорость вертикального перемещения заднего моста;

in_4 – вертикальное перемещение остова;

in_5 – скорость вертикального перемещения остова;

in_6 – угловое положение остова;

in_7 – скорость углового перемещения остова;

in_8 – вертикальное перемещение водителя;

in_9 – скорость вертикального перемещения водителя.

Это означает, что вертикальные перемещения и скорости компонент МЭС, а также угловые скорость и перемещение остова в начале моделирования равны нулю.

2. Определяем моменты времени начала $T_{\text{нач}}$ и конца $T_{\text{кон}}$ моделирования. В нашем случае примем: $T_{\text{нач}} = 0$ с, $T_{\text{кон}} = 10$ с.

3. Определяем количество расчетных точек N на данном временном участке. Увеличение числа точек приводит к повышению точности и, одновременно, возрастанию времени, затрачиваемому на расчет. В нашем расчете мы принимаем $N = 10^4$.

4. Определяем правую часть уравнения – матрицу D , которая будет содержать производные искомого решения:

$$D(t, \text{in}) := \left(\text{in}_1 \frac{d^2 Z_{\text{нМ}}}{dt^2} \text{in}_3 \frac{d^2 Z_{3M}}{dt^2} \times \right. \\ \left. \times \text{in}_5 \frac{d^2 Z_O}{dt^2} \text{in}_7 \frac{d^2 \alpha}{dt^2} \text{in}_9 \frac{d^2 Z_B}{dt^2} \right)^T. \quad (9)$$

В качестве аргументов данной функции передается вначале независимая переменная t – время и вектор начальных условий. Вторые производные по времени для перемещений различных узлов определяются делением на соответствующие массы уравнений в системе (7).

5. Производим решение уравнений методом Рунге – Кутта 4-го порядка:

$$\text{Out} := \text{rkfixed}(\text{in}, T_{\text{нач}}, T_{\text{кон}}, N, D). \quad (10)$$

В результате расчета получим матрицу решений дифференциального уравнения Out, первым столбцом в которой являются значения независимой переменной – времени, а все последующие – в соответствии с заданными начальными условиями.

Программный пакет MathCAD позволяет создавать анимированное представление перемещений элементов конструкции МЭС при наезде на единичное препятствие с помощью программной переменной, обозначаемой как FRAME. Эта переменная при расчете может принимать значения от 0 до 999 в зависимости от потребностей пользователя. Причем расчет проводится для каждого значения этой переменной с самого начала. Одновременно записывается в видеофайл выбранная пользователем область рабочего пространства программы, как правило, – двумерный или трехмерный график [5].

Учитывая, что одно вычисление матрицы решений нашей системы на современном высокопроизводительном ПК составляет около 40 с, то расчет и создание анимированного представления перемещения элементов конструкции МЭС может продлиться более 10 час.

Чтобы избежать ненужного и длительного пересчета решения его необходимо сохранить в файл, а затем обращаться к нему при создании анимации из другого расчетного файла. Для записи в файл в среде MathCAD используется функция WRITEPRN [7]. Она создает текстовый файл нужной конфигурации с разрешением *.prn. Его можно просматривать и редактировать блокнотом Windows.

Пример записи результатов моделирования в файл в корневом каталоге диска C:

$$\text{WRITEPRN}("C:\text{output.prn}") := \text{Out} . \quad (11)$$

В дальнейшем мы будем обращаться к данному файлу из вновь созданного расчетного файла среды MathCAD. Доступ к файлу решения осуществляется с помощью функции READPRN:

$$\text{Input} := \text{READPRN}("C:\text{output.prn}") . \quad (12)$$

После исполнения указанной строчки содержимое сохраненной матрицы решений копируется в матрицу Input. Эта операция выполняется практически мгновенно, так как при этом отсутствуют сложные математические вычисления, а идет лишь обращение к дисковому пространству.

Для создания качественного анимированного представления модели поведения кон-

структивных элементов МЭС при переезде единичного препятствия необходимо отобразить перемещение каждого элемента в отдельности при помощи некоторых геометрических примитивов, легко задаваемых на двумерных чертежах, например, прямоугольников, квадратов или окружностей. Для этого необходимо создать прототипы функций, которые будут использованы для отображения некоторых конструктивных элементов в соответствии с принятыми ограничениями модели.

Следует указать, что результатом выполнения указанных прототипов функций будет создание двумерных массивов, состоящих из двух столбцов с n -м количеством точек, необходимым для отображения замкнутого контура примитива.

По понятным причинам, необходимое количество точек для качественного отображения окружности серьезно превышает количество, требуемое для отрисовки прямоугольника или квадрата, поэтому применение окружностей целесообразно ограничить.

Ниже приведены прототипы функций для создания квадрата со стороной a , прямоугольника высотой a и длиной $(L_{\text{п}} + L_{\text{з}} + a)$ и окружности радиусом R , центры которых расположены на расстоянии L от начала координат вдоль оси x и на расстоянии H от начала координат вдоль оси y . При этом квадрат и круг не могут совершать вращательного движения, а прямоугольник может. Следует обратить внимание, что для отрисовки окружности радиусом R , с аналогичными аргументами положения, необходимо 37 точек. Меньшее количество может отразиться на качестве отображения круга.

$$\text{SQUARE}(a,L,H) := \begin{cases} x_0 \leftarrow L - a / 2 \\ x_2 \leftarrow L + a / 2 \\ x_1 \leftarrow x_0 \\ x_3 \leftarrow x_2 \\ x_4 \leftarrow x_0 \\ res^{(0)} \leftarrow x \\ y_0 \leftarrow H - a / 2 \\ y_1 \leftarrow H + a / 2 \\ y_2 \leftarrow y_1 \\ y_3 \leftarrow y_0 \\ y_4 \leftarrow y_0 \\ res^{(1)} \leftarrow y \\ res \quad ; \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 \text{RECT}(a, \alpha, L, H) := & \left\{ \begin{array}{l} x_0 \leftarrow L - [(a/2 + L_r) \cdot \cos(\alpha) - \\ - a/2 \cdot \sin(\alpha)] \\ x_1 \leftarrow x_0 - a \cdot \sin(\alpha) \\ x_2 \leftarrow x_1 + (a + L_r + L_c) \cdot \cos(\alpha) \\ x_3 \leftarrow x_0 + (a + L_r + L_c) \cdot \cos(\alpha) \\ x_4 \leftarrow x_0 \\ res^{(0)} \leftarrow x \\ y_0 \leftarrow H - [(a/2 + L_r) \cdot \sin(\alpha) - \\ - a/2 \cdot \cos(\alpha)] \\ y_1 \leftarrow H + a \cdot \cos(\alpha) \\ y_2 \leftarrow y_1 + (a + L_r + L_c) \cdot \sin(\alpha) \\ y_3 \leftarrow y_0 + (a + L_r + L_c) \cdot \sin(\alpha) \\ y_4 \leftarrow y_0 \\ res^{(1)} \leftarrow y \\ res \end{array} \right. ; \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{CIRCLE}(R, L, H) := & \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..36 \\ \left\{ \begin{array}{l} x_i \leftarrow L + \cos(i \cdot \pi / 18) \\ y_i \leftarrow H + \sin(i \cdot \pi / 18) \end{array} \right. \\ res^{(0)} \leftarrow x \\ res^{(1)} \leftarrow y \\ res \end{array} \right. \quad (15)
 \end{aligned}$$

Внешний вид квадрата, прямоугольника и окружности, отображенных с использованием написанных нами функций, представлен на рис. 4.

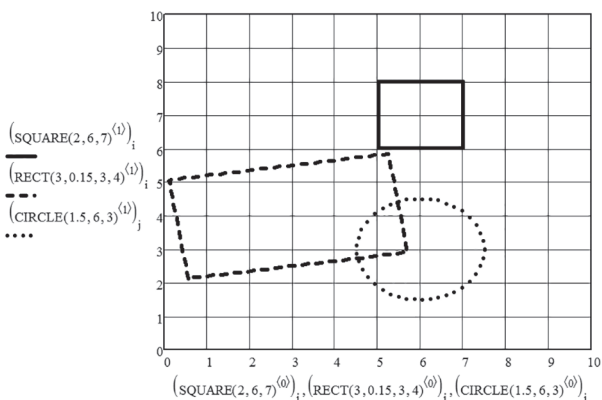


Рис. 4. Пример одновременного отображения фигур на двумерных графиках в среде MathCAD

Теперь, если привязать значение высоты положения квадрата или прямоугольника к системной переменной FRAME, можно создать анимацию поднимающегося вдоль оси Y примитива.

Анимация создается при помощи пунктов меню MathCAD *Инструменты->Анимация->>Запись*. В появившемся окне необходимо определить предел изменения переменной FRAME, количество кадров в секунду, затем, не закрывая окна, мышью в рабочей зоне выделить записываемую область (как правило, это двумерный график) и нажать на кнопку *Анимировать*. Созданную анимацию можно сохранить в *.avi как видеофайл для дальнейшего анализа и демонстрации.

Кроме этого, переменную FRAME можно использовать для доступа к элементу массива. Если последовательно обращаться к элементам матрицы решений разработанной системы (7), предварительно привязав их к высотам положений примитивов, соответствующих конструктивным элементам трактора, можно создать анимированное представление поведения трактора при переезде через единичное препятствие.

Следует напомнить, что переменная FRAME может принимать максимум тысячу значений, при этом количество строк в матрице решений может значительно превышать данное значение. В этом случае необходимо отбросить часть строк решений, например при использовании 10 тыс. точек решения необходимо использовать каждую десятую строчку результатов для создания анимации.

Следует на каждом шаге расчета сохранять текущие значения решения в отдельный вектор STEP, к которому в дальнейшем и обращаться

$$\text{STEP} := (\text{Input}^T)^{\langle \text{FRAME} - 10 \rangle} \quad (16)$$

Необходимо заранее расположить примитивы на графике в максимальном соответствии с их пространственным положением в конструкции трактора.

Если предварительно сдвинуть на ΔL вдоль оси x от начала координат центр переднего моста, а значение ΔH использовать в качестве вертикального расстояния между элементами, получим следующую систему выражений для упрощенного изображения исследуемых конструктивных элементов трактора:

$$\begin{cases} \text{PM} := \text{SQUARE} (a, \Delta L, \Delta H + \text{STEP}_1) \\ \text{ZM} := \text{SQUARE} (a, \Delta L + L_{\text{п}} + L_3, \Delta H + \text{STEP}_3) \\ \text{OST} := \text{RECT} (a, \text{STEP}_7, \Delta L + L_{\text{п}}, 2 \cdot \Delta H + \text{STEP}_5) \\ \text{SID} := \text{SQUARE} (a, \Delta L + L_{\text{п}} + L_c, 3 \cdot \Delta H + \text{STEP}_9) \end{cases} \quad (17)$$

Данное упрощенное изображение представлено на рис. 5.

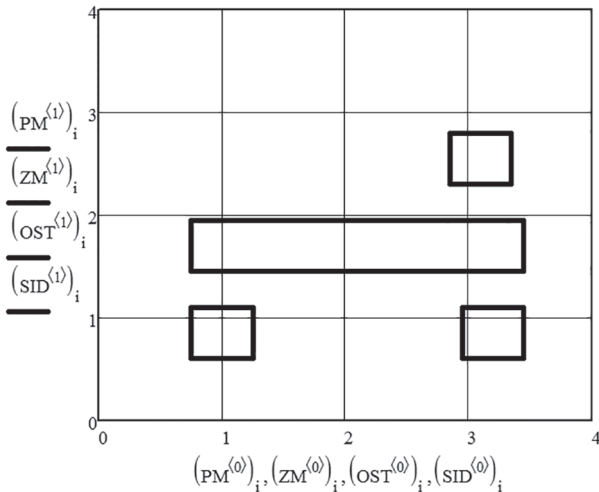


Рис. 5. Упрощенное изображение исследуемых конструктивных элементов трактора при значениях геометрических параметров:

$$\begin{aligned} \Delta L = 1, \Delta H = 0,85, a = 0,5, L_{\text{п}} = 1,2, \\ L_3 = 1,0, L_c = 0,9 [4] \end{aligned}$$

Добавив пробег через график единичной неровности по формуле (1), в соответствующий момент переезжаемой трактором, можем получить качественную визуализацию процесса переезда МЭС единичного препятствия заданной формы.

Выводы

1. Создаваемые при решении систем дифференциальных уравнений матрицы численного решения могут быть использованы не только для графических представлений поведения исследуемого объекта, но и для анимированных отображений данных процессов.

2. Анимация способна наглядно продемонстрировать характер поведения смоделированных объектов с течением времени, сравнить его с поведением реальных объектов, и быстро проанализировать качество математической модели, выявить ее недостатки и найти ошибки, допущенные при моделировании.

3. Созданные по описанной методике визуализированные представления могут приме-

няться для демонстраций при осуществлении докладов, разъяснении принципов работы и в других смежных ситуациях.

Литература

1. Воскобойников Ю.Е., Очков В.Ф. Программирование и решение задач в пакете MathCAD : учеб. пособие. Новосибирск: НГАСУ, 2003. 132 с.
2. Воскобойников Ю.Е. Регрессионный анализ данных в пакете MathCAD: учебное пособие. М.: «Лань», 2011. 224 с.
3. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: «Наука», 1978. 518 с.
4. Конструкция тракторов и автомобилей: учебное пособие / О.И. Поливаев [и др.]; под общ. ред. О.И. Поливаева. М.: «Лань», 2013. 286 с.
5. Майер Р.В. Решение физических задач с помощью пакета MathCAD. М.: «Лань». 2006. 203 с.
6. Поливаев О.И., Юшин А.Ю. Снижение воздействия транспортной вибрации на операторов мобильных энергетических средств: монография [Электронный ресурс]. Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет, 2008. 177 с. URL: <http://catalog.vsau.ru/elib/books/b87113.pdf> (дата обращения: 03.07.2018).
7. Поршнев С.В. Компьютерное моделирование физических процессов с использованием пакета MathCAD. М.: «Горячая линия – Телеком», 2002. 252 с.
8. Ротенберг Р.В. Подвеска автомобиля. 3-е изд. М.: «Машиностроение», 1972. 392 с.
9. Силаев А.А. Спектральная теория подрессоривания транспортных машин. 2-е изд. М.: «Машиностроение», 1972. 192 с.
10. Устинов Ю.Ф. Механические колебания и виброакустическая защита транспортно-технологических строительных машин. Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2015. 241 с.

References

1. Voskobojnikov YU.E., Ochkov V.F. Programirovanie i reshenie zadach v pakete MathCAD [Programming and problem solving in MathCAD package]: ucheb. posobie. Novosibirsk: NGASU Publ., 2003. 132 p.
2. Voskobojnikov YU.E. Regressionnyj analiz dannyh v pakete MathCAD [Regression analysis of data in the MathCAD package]: uchebnoe posobie. Moscow: «Lan» Publ., 2011. 224 p.
3. Kalitkin N.N. CHislennye metody [Numerical methods]. Moscow: «Nauka» Publ., 1978. 518 p.

4. Konstrukciya traktorov i avtomobilej [Design of tractors and automobiles]: uchebnoe posobie. O.I. Polivaev [i dr.] ; pod obshch. red. O.I. Polivaeva. Moscow: «Lan» Publ., 2013. 286 p.
5. Majer R.V. Reshenie fizicheskikh zadach s pomoshch'yu paketa MathCAD [The solution of physical problems using Mathcad]. Moscow: «Lan» Publ.. 2006. 203 p.
6. Polivaev O.I., YUshin A.YU. Snizhenie vozdeystviya transportnoj vibracii na operatorov mobil'nykh chnergeticheskikh sredstv [Reducing the impact of transport vibration on mobile energy operators]: monografiya [EHlektronnyj resurs]. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet, 2008. 177 p. URL: <http://catalog.vsau.ru/elib/books/b87113.pdf> (data obrashcheniya: 03.07.2018).
7. Porshnev S.V. Komp'yuternoe modelirovanie fizicheskikh processov s ispol'zovaniem paketa MathCAD [Computer simulation of physical processes using MathCAD package]. Moscow: «Goryachaya liniya – Telekom» Publ., 2002. 252 p.
8. Rotenberg R.V. Podveska avtomobilya [Automobile suspension]. 3-e izd. Moscow: «Mashinostroenie» Publ., 1972. 392 p.
9. Silaev A.A. Spektral'naya teoriya podressorivaniya transportnykh mashin [Spectral theory of the suspension of transport vehicles]. 2-e izd. Moscow: «Mashinostroenie» Publ., 1972. 192 p.
10. Ustinov YU.F. Mekhanicheskie kolebaniya i vibroakusticheskaya zashchita transportno-tekhnologicheskikh stroitel'nykh mashin [Mechanical vibrations and vibro-acoustic protection of transport and technological construction machines]. Voronezh: Voronezhskij gosudarstvennyj arhitekturno-stroitel'nyj universitet, EHBS ASV Publ., 2015. 241 p.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ПОДВЕСКИ СИДЕНЬЯ НА СТЕНДЕ-ГИДРОПУЛЬСАТОРЕ

DETERMINATION OF THE TRANSFER FUNCTION OF THE PNEUMATIC SUSPENSION OF THE SEAT ON THE HYDRAULIC PULSATOR STAND

М.В. ЛЯШЕНКО, д.т.н.

А.В. ПОЗДЕЕВ, к.т.н.

Д.А. ЧУМАКОВ

А.И. ИСКАЛИЕВ

Волгоградский государственный технический
университет (ВолГТУ), Волгоград, Россия,
ts@vstu.ru, asamat-iskaliev@mail.ru

M.V. LYASHENKO, DSc in Engineering

A.V. POZDEEV, PhD in Engineering

D.A. CHUMAKOV

A.I. ISKALIEV

Volgograd state technical University, Volgograd, Russia,
ts@vstu.ru, asamat-iskaliev@mail.ru

В статье представлены результаты испытаний пневматической подвески сиденья фирмы Sibeco с ножничным направляющим механизмом на одноопорном стенде с гидравлическим приводом производства индийской компании BiSS. Пневматическая подвеска сиденья относится к важнейшим составляющим системы виброзащиты человека-оператора транспортного средства. Для исследователей, инженеров и конструкторов, занимающихся вопросами повышения уровня комфортабельности новой автотракторной техники, очень важно определить динамические характеристики систем поддрессоривания существующих моделей сидений с целью дальнейшего проведения конструктивных мероприятий по улучшению их виброзащитных свойств. Важнейшей динамической характеристикой, оценивающей виброзащитные свойства подвески сиденья, является передаточная функция. Цель испытаний – определение передаточной функции. Описана установка, включающая в себя металлические элементы соединения исполнительного механизма стенда-гидропульсатора и грузов, имитирующих поддрессоренную массу, с подвеской сиденья, а также датчик силы, встроенный в конструкцию стенда, и датчики ускорений, закрепленные с торца на верхней раме и основании подвески. Исследования проводились на режимах гармонического возбуждения рассматриваемой системы поддрессоривания с определенной частотой. С точностью до 0,001 g записывались временные реализации сигналов от датчиков ускорений, которые затем обрабатывались для получения среднеквадратических значений и подсчета величины передаточной функции. В ходе обработки и анализа полученных данных построены зависимости передаточной функции пневматической подвески сиденья от частоты кинематических воздействий стенда и выявлены резонансные частотные диапазоны. В заключение также определен характер изменения экспериментальной передаточной функции рассматриваемой системы поддрессоривания сиденья с увеличением частоты возмущений.

Ключевые слова: вибрация, ускорения, стенд-гидропульсатор, датчик, подвеска сиденья, передаточная функция, пневматическая пружина, амортизатор, экспериментальная установка, частота.

The article presents the results of tests of the pneumatic suspension of the seat of the Sibeco company with a scissor guide mechanism on a single-point stand with a hydraulic drive manufactured by the Indian company BiSS. Pneumatic seat suspension is one of the most important components of the vibration protection system of the human operator of the vehicle. For researchers, engineers and designers involved in improving the level of comfort of new automotive equipment, it is very important to determine the dynamic characteristics of the systems of suspension of existing models of seats in order to further carry out constructive measures to improve their vibration protection properties. The most important dynamic characteristic that assesses the vibration-proof properties of the seat suspension is the transfer function. The purpose of the test is to determine the transfer function. The set includes metal elements connect the actuator of hydraulic pulsator stand and cargo, simulates the sprung mass, suspension seat, and a force sensor integrated into the stand design, and sensors accelerations fixed end to the upper frame and the base suspension. The studies were carried out on the modes of harmonic excitation of the considered system of suspension with a certain frequency. Time realizations of signals from acceleration sensors were recorded with an accuracy of 0,001 g, which were then processed to obtain RMS values and calculate the value of the transfer function. During the processing and analysis of the data obtained, the dependences of the transfer function of the seat air suspension on the frequency of the kinematic effects of the stand were built and the resonance frequency ranges were revealed. In conclusion, the nature of changes in the experimental transfer function of the seat suspension system with an increase in the frequency of disturbances is also determined.

Keywords: vibration, acceleration, hydraulic pulsator stand, sensor, seat suspension, transfer function, pneumatic spring, shock absorber, experimental setup, frequency.

Введение

Выполнение сельскохозяйственных технологических и транспортных операций сопровождается генерацией вредных воздействий динамических нагрузок, вибраций и шума, что отрицательно сказывается на производительности, качестве работы и, главное, на здоровье человека-оператора, осуществляющего управление наземной тягово-транспортной техникой.

Сиденье – последнее звено в сложной динамической цепи передачи механических колебаний от различных источников (двигателя, трансмиссии, неровностей дороги и т.д.) к телу человека. Для исследователей, инженеров, конструкторов, занимающихся вопросами повышения уровня комфортабельности авто-тракторной техники, очень важно определить динамические характеристики подвесок существующих моделей сидений с целью дальнейшего проведения конструктивных мероприятий по улучшению их виброзащитных свойств [1, 2].

Важнейшей динамической характеристикой, оценивающей виброзащитные свойства подвески сиденья, является передаточная функция [3, 4]:

$$H(f) = \frac{\ddot{z}(f)}{\ddot{q}(f)},$$

где $\ddot{z}(f)$ – среднеквадратическое значение амплитуды ускорения на верхней раме (подушке сиденья) за время t при частоте возмущения f ; $\ddot{q}(f)$ – среднеквадратическое значение амплитуды ускорения возмущения на платформе стенда, закрепленной с основанием сиденья, за время t при частоте возмущения f .

Цель исследований

Целью данной работы является определение передаточной функции пневматической подвески сиденья по результатам стендовых испытаний.

Объект исследования – сиденье P405C/KA80HT фирмы Sibeco с пневматической подвеской, которое широко применяется в автомобиле- и тракторостроении (рис. 1) [5].

Основание 1 является несущим элементом для всей конструкции и сопрягается со средней рамой 2 системой рычагов по типу «ножницы» 3, что позволяет раме 2 перемещаться строго по вертикали параллельно основанию 1, задействовав поступательно движу-

щиеся ползуны 10. При достижении крайнего положения вниз средняя рама 2 упирается в ограничитель хода 7. Одни из параллельных рычагов «ножниц» 3 жестко соединены между собой кронштейном 8. Между кронштейном 8 и основанием 1 под углом установлена пневматическая рессора 4 фирмы Continental Contitech SZ51-7 (рис. 2, поз. 1), представленная в качестве упругого элемента. В ее внутреннюю полость подается под давлением воздух, за счет чего подвеска приобретает упругую характеристику. На одном из рычагов «ножниц» 3 закреплен блок управляющих клапанов, который в зависимости от высоты подъема средней рамы 2 относительно основания 1 регулирует давление воздуха в пневматической рессоре 4. Таким образом, обеспечивается постоянное статическое положение оператора. На верхней раме 5 сбоку расположена специальная кнопка сброса воздуха, предназначенная для удобства посадки и выхода с рабочего места. Также между основанием 1 и одним из рычагов «ножниц» 3 присутствует гидравлический телескопический амортизатор 9 фирмы MAYSAN TS 3034 (рис. 2, поз. 2), служащий для гашения колебаний. Верхняя рама 5 сопряжена со средней рамой 2 посредством системы рычагов 11, реализующей регулировку положения подушки сиденья по высоте и по

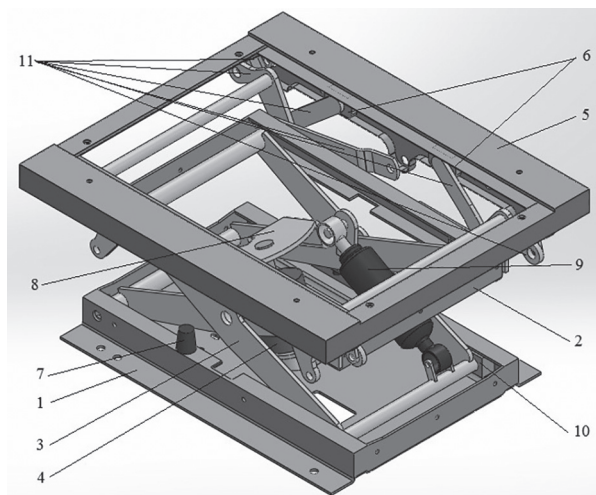


Рис. 1. Система поддрессирования сиденья Sibeco:

1 – основание; 2 – средняя рама; 3 – система рычагов по типу «ножницы»; 4 – пневматическая рессора; 5 – верхняя рама; 6 – ползуны механизма регулировки положения подушки сиденья; 7 – ограничитель хода; 8 – кронштейн; 9 – амортизатор; 10 – ползун направляющего механизма; 11 – система рычагов механизма регулировки положения подушки сиденья

крену (вперед, назад). Передняя и задняя часть верхней рамы 5 имеют возможность независимо друг от друга перемещаться по вертикали и блокироваться при помощи сопряжения пальцев ползунов 6 с зубчатой рейкой.

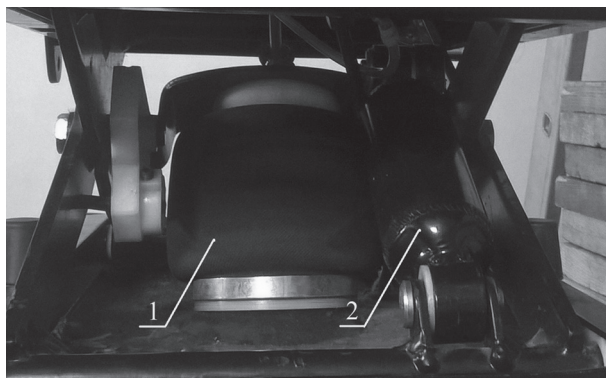


Рис. 2. Упругодемпфирующие элементы подвески сиденья:

- 1 – пневматическая рессора Contitech SZ51-7;
- 2 – амортизатор MAYSAN TS 3034

Материалы и методы

Экспериментальное определение передаточной функции пневматической подвески сиденья P405C/KA80HT фирмы Sibeco проводилось на одноопорном стенде с гидравлическим приводом движения производства индийской компании BiSS [6]. Была собрана установка (рис. 3), включающая непосредственно саму подвеску сиденья 3 с ножничным направляющим механизмом, нижнюю плиту 4, соединяющую основание сиденья со штоком 5 гидроцилиндра исполнительного устройства стенда, и закрепленную на верхней раме подвески плиту 2 с центральной осью. На верхней плите устанавливались металлические блины 1, имитирующие весовую нагрузку.

Мгновенные значения ускорений с точностью до 0,001 g фиксировали 2 штатных датчика, входящие в комплектацию стенда (рис. 4). Их закрепление с торца на основании и верхней раме подвески сиденья при помощи резьбового соединения было продиктовано удобством расположения проводов связи датчиков с системным блоком управления стенда.

Закон движения штока гидропульсатора стенда – синусоидальный гармонический. Весовая нагрузка (включая грузы и верхнюю плиту с осью) – 75 кг. Испытания осуществлялись с различными амплитудами возбуждения (5 и 10 мм) и давлением воздуха в пневматической рессоре 2 ат в диапазоне частот воз-

буждения от 0,6 до 10 Гц с шагом 0,2 Гц. При разработке данной методики использовались положения существующих стандартов [3, 4].

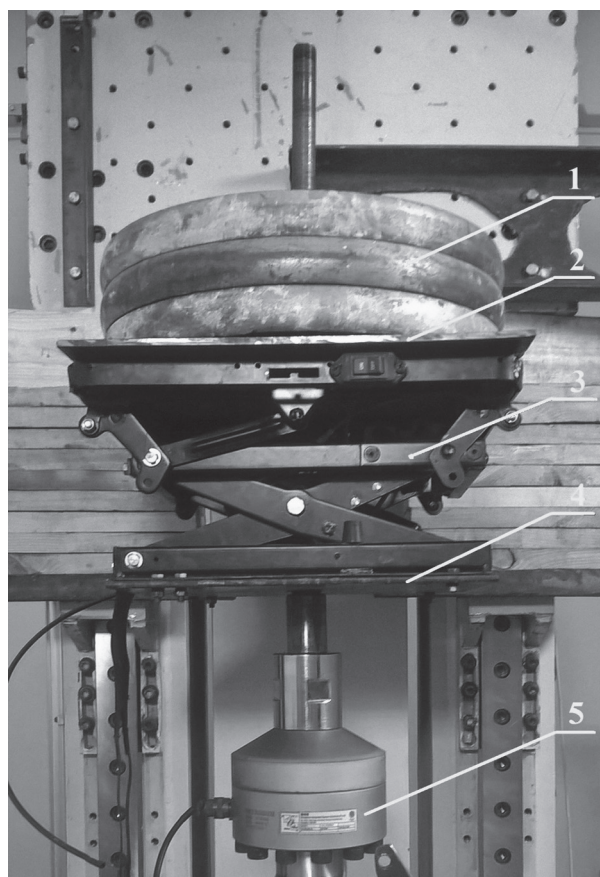


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки:

- 1 – металлические грузы; 2 – верхняя плита с центральной осью; 3 – подвеска сиденья;
- 4 – нижняя плита; 5 – шток гидропульсатора стенда

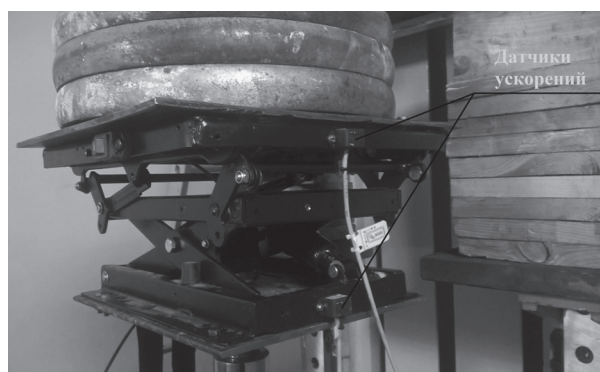


Рис. 4. Расположение датчиков ускорений на экспериментальной установке

На каждом режиме записывались временные реализации сигналов от датчиков ускорений (рис. 5), которые затем обрабатывались для получения среднеквадратических значений.

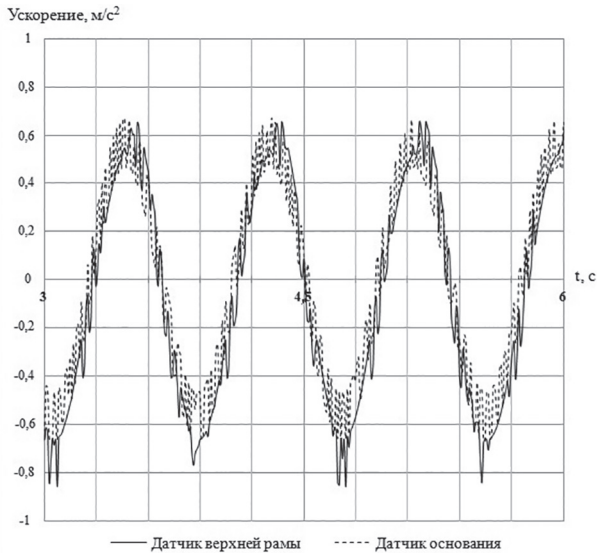


Рис. 5. Сигналы датчиков ускорений верхней рамы и основания (амплитуда возбуждения 10 мм с частотой 1,2 Гц)

После соответствующей обработки данных были построены экспериментальные зависимости передаточной функции подвески сиденья от частоты кинематических возмущений. Произведено их сравнение с теоретическими кривыми, полученными в результате математического моделирования (рис. 6, 7).

Выводы

Из полученных зависимостей (рис. 6 и 7) следует:

- частота собственных колебаний подвески сиденья с грузом находилась в диапазоне 1,2–1,4 Гц;

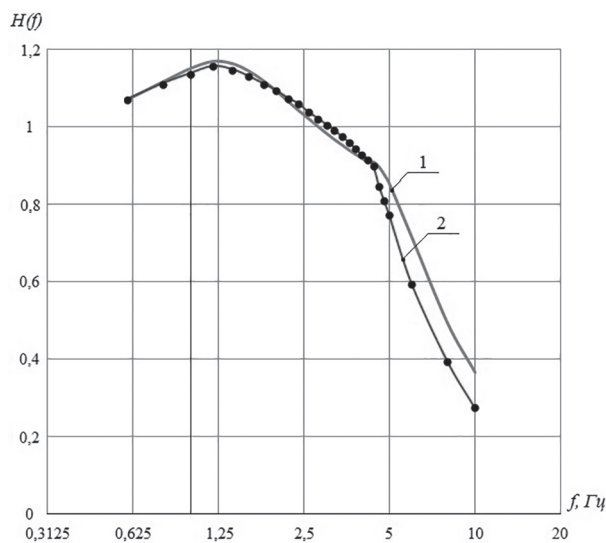


Рис. 6. Передаточная функция подвески сиденья Sibeco (амплитуда возбуждения – 5 мм):
1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

– величина экспериментальной передаточной функции на резонансе при амплитуде возбуждения стэнда 5 мм равнялась 1,156, а при 10 мм – 1,129;

– значения экспериментальной передаточной функции интенсивно уменьшались при увеличении частоты возбуждения от 4,6 Гц на режиме с амплитудой 5 мм и от 3,8 Гц на режиме с амплитудой 10 мм.

Литература

1. Ляшенко М.В., Шеховцов В.В., Искалиев А.И. Математическая модель пневматической релаксационной подвески сиденья с рекуперацией энергии колебаний // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 4. С. 30–37.
2. Ляшенко М.В., Потапов П.В., Искалиев А.И. Analysis of vibroprotection characteristics of pneumatic relaxation seat suspension with capability of vibration energy recuperation [Электронный ресурс] // MATEC Web of Conferences. Vol. 129: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (IC-MTMTE 2017) (Sevastopol, Russia, September 11–15, 2017) / eds.: S. Bratan [et al.] ; Sevastopol State University, National University of Science and Technology «MISIS», Polzunov Altai State Technical University, Inlink Ltd. and International Union of Machine Builders. [Publisher: EDP Sciences], 2017. 5 p. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/43/mateconf_icmtmte2017_06018.pdf.
3. ГОСТ ИСО 10326-1-2002. Вибрация. Оценка вибрации сидений транспортных средств по резуль-

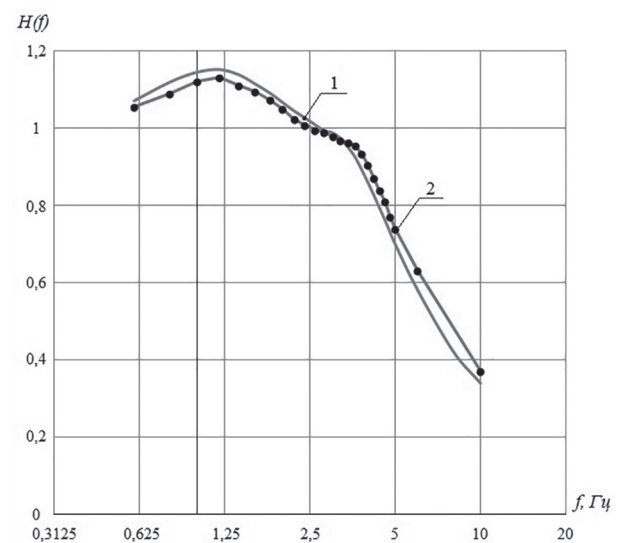


Рис. 7. Передаточная функция подвески сиденья Sibeco (амплитуда возбуждения – 10 мм):
1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

татам лабораторных испытаний. Часть 1. Общие требования. введ. 01.11.07. М.: Стандартиформ, 2006. 10 с.

4. ГОСТ 31316-2006. Вибрация. Лабораторный метод оценки вибрации, передаваемой через сиденье оператора машины. Тракторы сельскохозяйственные колесные. введ. 01.07.08. М.: Стандартиформ, 2008. 16 с.
5. Sibeco. Сиденья оператора для строительной и сельхозтехники [Электронный ресурс]. 2018. URL: <http://sibeco.net/catalog/seats-for-operators/>.
6. Устройство и функционирование стенда-гидропульсатора: метод. указ. / сост.: А.В. Поздеев, В.В. Новиков, А.В. Похлебин; ВолгГТУ. Волгоград, 2016. 16 с.

References

1. Lyashenko M.V., Shekhovcov V.V., Iskaliev A.I. The mathematical model of a pneumatic relaxation suspension seat with vibrational energy recovery. *Traktory i sel'hoz mashiny*. 2017. No 4, pp. 30–37 (in Russ.).
2. Lyashenko M.V., Potapov P.V., Iskaliev A.I. Analysis of vibroprotection characteristics of pneumatic relaxation seat suspension with a capability of vibration energy recuperation [Электронный ресурс] // MATEC Web of Conferences. Vol. 129 : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017) (Sevastopol, Russia, September 11–15, 2017) / eds.: S. Bratan [et al.]; Sevastopol State University, National University of Science and Technology «MISIS», Polzunov Altai State Technical University, Inlink Ltd. and International Union of Machine Builders. [Publisher: EDP Sciences], 2017. 5 p. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/43/mateconf_icmtmte2017_06018.pdf.
3. GOST ISO 10326-1-2002. Vibration. Evaluation of vehicle seat vibration based on laboratory test results. *CHast' 1. Obshchie trebovaniya*. введ. 01.11.07. Moscow: Standartinform Publ., 2006. 10 p.
4. ГОСТ 31316-2006. Вибрация. The laboratory method of assessing the vibration transmitted through the seat of the machine operator. *Tractors agricultural wheeled*. 01.07.08. Moscow: Standartinform Publ., 2008. 16 p.
5. Sibeco. Operator seats for construction and agricultural equipment [Электронный ресурс]. 2018. URL: <http://sibeco.net/catalog/seats-for-operators/>.
6. *Ustrojstvo i funkcionirovanie stenda-gidropul'sara* [The design and operation of the radio pulsar stand]: метод. указ. Сост.: А.В. Поздеев, В.В. Новиков, А.В. Похлебин; Volgograd, VolgGTU Publ. 2016. 16 p.

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ РАБОЧИЙ ОРГАН ДЛЯ РЫХЛЕНИЯ ПОЧВЫ В РЯДАХ ЯГОДНЫХ КУЛЬТУР

IMPROVED WORKING TOOL FOR LOOSENING THE SOIL IN THE ROWS OF BERRY CROPS

О.В. ГОРДЕЕВ, д.т.н.
В.О. ГОРДЕЕВ

Южно-Уральский научно-исследовательский институт садоводства и картофелеводства – филиал ФГБНУ «Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук», Челябинск, Россия, O.gordeev60@mail.ru

O.V. GORDEEV, DSc in Engineering
V.O. GORDEEV

South Ural Research Institute of Horticulture and Potato – branch «Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», Chelyabinsk. Russia, O.gordeev60@mail.ru

Технологии по уходу за ягодными плантациями предусматривают использование ручного труда для обработки почвы между кустами растений. Отсутствие механизированного ухода за почвой между кустами растений останавливает многих фермеров от посадки новых плантаций. Цель исследований – усовершенствование схемы рабочего органа для рыхления почвы в рядах ягодных культур. Изготовлена и испытана разработанная в институте экспериментальная установка с приспособлением для межкустовой обработки почвы. Установлено, что ассиметричный рабочий орган с радиусом вращения рыхлительных зубьев более 0,5 м практически не работает. Обоснован минимальный и экономически целесообразный радиус вращения рыхлительных зубьев, расположенных на одинаковом расстоянии друг от друга на дуге окружности ассиметричного рабочего органа. Представлена зависимость ширины петли удлиненной циклоиды и длины участка обработки почвы от расстояния между кустами растений в рядах ягодных культур для определения необходимого количества рыхлительных зубьев. Приведена схема усовершенствованного рабочего органа в виде вращающегося ассиметричного кругового сектора с рыхлительными зубьями, расположенными на дуге кругового сектора. Получено выражение, определяющее угловую меру кругового сектора.

Ключевые слова: ягодные культуры, рабочий орган, обработка почвы в рядке, удлиненная циклоида, петля удлиненной циклоиды, круговой сектор, ассиметричная лопасть.

Technologies for the care of berry plantations involve the use of manual labor for tillage between the bushes of plants. The lack of mechanized soil care between plant bushes stops many farmers from planting new plantations. The purpose of the research is to improve the layout of the working tool for loosening the soil in the rows of berry crops. An experimental setup with a device for inter-waste tillage was developed and tested at the institute. It was found that the asymmetric working body with a radius of rotation of the teeth loosening more than 0,5 m practically does not work. The minimum and economically feasible radius of rotation of the loosening teeth located at the same distance from each other on the arc of the circle of the asymmetric working tool is justified. The dependence of the loop width of the elongated cycloid and the length of the soil tillage area on the distance between the plant bushes in the rows of berry crops to determine the required number of loosening teeth is presented. The scheme of the improved working tool in the form of a rotating asymmetric circular sector with loosening teeth located on the arc of the circular sector is presented. An expression defining the angular measure of the circular sector is obtained.

Keywords: berry crops, working tool, tillage in a row, elongated cycloid, elongated cycloid loop, circular sector, asymmetric blade.

Введение

Из литературных источников известно, что технологии по уходу за ягодными плантациями предусматривают ручной труд (мотыжение) для обработки почвы между кустами в рядах в первые три-четыре года после посадки [1, 2, 3].

Отсутствие механизированного ухода за почвой в рядах ягодных культур до плодоношения останавливает многих фермеров от посадки и производства ягод. Особенно в первые годы посадки сорняки сильно угнетают молодые насаждения, и большая их часть может погибнуть.

Известны приспособления к рабочим органам культиваторов для одновременной междустовой обработки почвы с установленными на вертикальных поворотных валах рыхлителей почвы с промежуточными гидроцилиндром и пружинным компенсатором, управляемых рычажными щупами [4, 5].

Однако такие приспособления достаточно сложны конструктивно и в управлении автоматов переключений. Плавность хода штока гидроцилиндра зависит от многих факторов: износа гидрораспределителя, оборотов двигателя и времени реакции автоматов управления.

В ФГБНУ «Южно-Уральский НИИ садоводства и картофелеводства» разработана схема рабочего органа для рыхления почвы в рядах ягодных культур, которая включает усовершенствованный механизм доставки рыхлителя почвы в пространство между кустами растений [6]. При движении рабочего органа вдоль ряда ягодных культур рыхлительные зубья, двигаясь по траектории удлиненной циклоиды, плавно входят в пространство между кустами растений, взрыхляют почву в зоне обработки и плавно выходят обратно. Расстояние между кустами в рядах l приравнено длине, производящей циклоиду окружности

$$l = 2\pi r, \quad (1)$$

где r – радиус, производящей циклоиду, окружности.

Приведена зависимость ширины петли удлиненной циклоиды d от радиуса

$$d = 2r \left(\cos^{-1} \frac{r}{R} - 1 \right), \quad (2)$$

где d – ширина петли удлиненной циклоиды; R – радиус удлиненной циклоиды (радиус рыхлительного зуба,двигающегося по траектории удлиненной циклоиды).

Исходя из ширины петли удлиненной циклоиды, равной ширине участка обработки между кустами в рядах, по графику зависимости определяют необходимый радиус вращения рыхлительного зуба.

Цель исследований

Усовершенствование схемы рабочего органа для рыхления почвы в рядах ягодных культур.

Методы и средства проведения исследований

В институте на базе производственной лаборатории по разработанной схеме была изготовлена экспериментальная установка с приспособлением для междустовой обработки почвы (рис. 1).

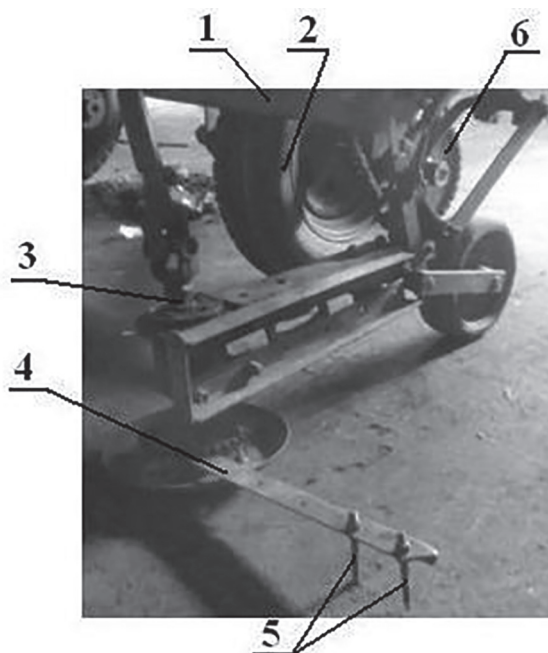


Рис. 1. Экспериментальная установка приспособления для междустовой обработки почвы в рядах ягодных культур

Приспособление включает: раму 1, опорные колеса 2, вертикальный вал 3, к нижней части которого присоединена ассиметричная горизонтальная лопасть 4 с почворыхлителями 5, в верхней части вертикального вала установлена ведомая звездочка, а на опорном колесе ведущая приводная звездочка 6.

В 2017 г. проведены предварительные испытания и исследования экспериментальной установки. На приспособление получен патент РФ на полезную модель № 177760 «Приспособление для междустовой обработки почвы» [7].

По результатам предварительных испытаний было установлено, что рабочий орган с длиной ассиметричной лопасти более 0,5 м на ровной поверхности описывает траекторию удлиненной циклоиды с расчетными параметрами, но плохо или совсем не работает на неровной поверхности почвы в рядах садовых культур. Исходя из этих соображений максимальный радиус вращения рыхлительного зуба $R_{max} \leq 0,5$ м.

Для обоснования минимального радиуса вращения рыхлительного зуба рассмотрим основные агротехнические требования к ягодным плантациям. Это ширина междурядья и расстояние между кустами растений l в рядах (рис. 2). Почва в рядах между кустами растений характеризуется зоной обработки b и защитной зоной z , в которой почва не должна обрабатываться из-за неглубокого залегания корней ягодных кустарников 3. Соответственно, $b = l - z$.

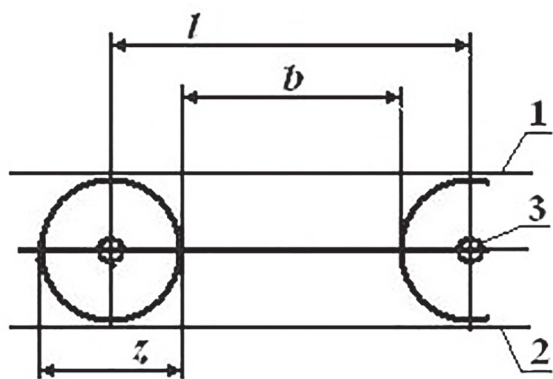


Рис. 2. Параметры ряда ягодных плантаций

В целях исключения травмирования кустов при обработке почвы траектория оси вращения рыхлительного зуба должна проходить по линии 1 (рис. 2) при движении в одном направлении и по линии 2 – при движении в обратном направлении. Отсюда минимальный радиус вращения рыхлительного зуба не должен быть меньше половины величины защитной зоны z :

$$R_{min} \geq \frac{z}{2}.$$

В первый год посадки защитная зона около растения составляет 0,3–0,4 м. Соответственно, минимальный радиус вращения рыхлительного зуба $R_{min} = 0,15–0,20$ м. В этом случае ширина петли удлиненной циклоиды будет намного меньше ширины участка обработки

почвы. Т.е. для обработки всего участка b необходимо, чтобы несколько рыхлительных зубьев с одинаковым радиусом вращения R совершали последовательные движения по траектории удлиненной циклоиды. К тому же, обработка почвы в рядах между кустами за два прохода не целесообразна и соответственно не эффективна. Для обработки почвы в зоне обработки b между линиями 1 и 2 (рис. 2) за один проход в одном направлении радиус вращения рыхлительного зуба должен быть равным (или больше) ширине защитной зоны.

На рис. 3 представлены траектории движения рыхлительных зубьев с разными радиусами вращения. Траектория 1 соответствует радиусу вращения, при котором ширина петли удлиненной циклоиды равна ширине участка обработки b . Траектории 2 – последовательные траектории рыхлительных зубьев с одинаковыми радиусами вращения R , равными (или больше) величине защитной зоны z .

Для обработки всего участка зоны b усовершенствованным рабочим органом с траекториями рыхлительных зубьев, соответствующими траекториям 2 (рис. 2), необходимо, чтобы рыхлительные зубья находились на дуге окружности кругового сектора с радиусом R на одинаковом угловом расстоянии друг от друга. Для определения величины угловой меры дуги кругового сектора, где должны располагаться рыхлительные зубья, рассмотрим крайние петли удлиненной циклоиды на участке обработки b (рис. 3).

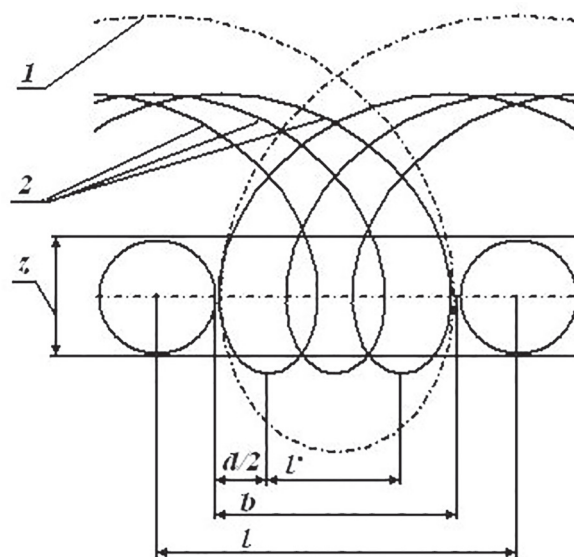


Рис. 3. Траектории рыхлительных зубьев с разными радиусами вращения

Из рис. 3 видно, что длина участка обработки складывается из трех отдельных участков:

$$b = \frac{d}{2} + l' + \frac{d}{2} = d + l',$$

где l' – длина дуги производящей циклоиду окружности.

Отсюда $l' = b - d$ и, соответственно, угловая мера кругового сектора в градусах равна

$$\alpha = \frac{180 \cdot l'}{\pi r}.$$

Для определения количества рыхлительных зубьев, необходимых для размещения на дуге кругового сектора с угловой мерой α и радиусом R , рассмотрим соотношение ширины петли удлиненной циклоиды d и длины участка обработки b в зависимости от расстояния между кустами l .

Из выражения (1) имеем радиус производящей циклоиду окружности

$$r = \frac{l}{2\pi}. \quad (3)$$

Тогда ширина петли удлиненной циклоиды с учетом выражений (2) и (3) равна

$$d = \frac{l}{\pi} \left(\cos^{-1} \frac{l}{2\pi R} - 1 \right).$$

Из литературных источников известно, что расстояние между кустами в рядах ягодных культур может варьировать от 0,7 до 1,7 м в зависимости от культуры и сорта (габитус куста) [2, 3].

На рис. 4 представлена зависимость длины участка обработки линия 1 и ширины петли удлиненной циклоиды линия 2 от расстояния между кустами в рядах ягодных культур.

Из рисунка видно, что с увеличением расстояния между кустами l и, соответственно, длины участка обработки b уменьшается ширина петли удлиненной циклоиды d . При $l = 0,7$ м ширина петли удлиненной циклоиды равна длине участка обработки ($d = 0,39$ м, $b = 0,4$ м). Соответственно, достаточно иметь один рыхлительный зуб на дуге окружности с радиусом R , а остальные зубья расположить на линии радиуса с расстоянием 80 мм друг от друга для качественного рыхления почвы. При $l = 1,1$ м, $d = 0,24$ м и $b = 0,8$ м, соответственно на дуге окружности необходимо расположить не менее трех рыхлительных зубьев.

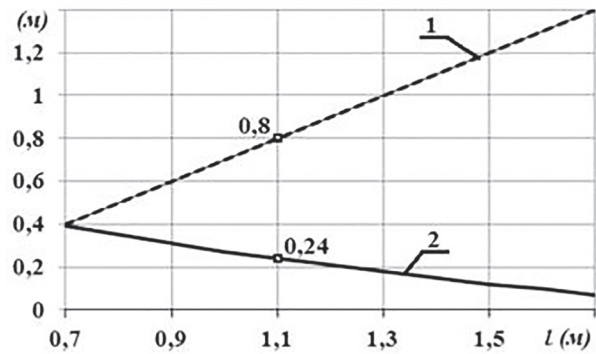


Рис. 4. Зависимость длины участка обработки b и ширины петли удлиненной циклоиды l от расстояния между кустами при $R = 0,35$ м

На рис. 5 представлена схема усовершенствованного рабочего органа для рыхления почвы между кустами в рядах ягодных культур. На дуге окружности l кругового сектора с радиусом R и угловой мерой α расположены в количестве трех единиц рыхлительные зубья 2. Для качественного рыхления почвы на линии радиусов на расстоянии 80 мм от них, согласно рекомендациям Е.С. Босого [8], расположены рыхлительные зубья 3 (также три единицы).

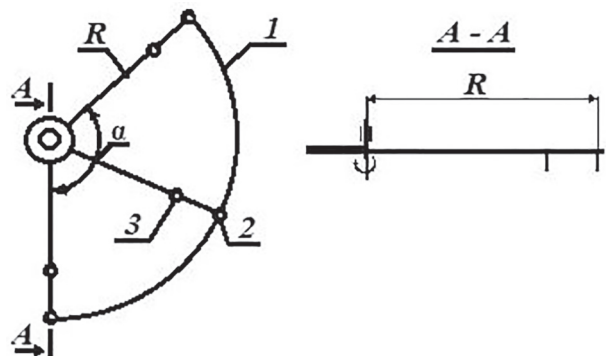


Рис. 5. Схема усовершенствованного рабочего органа для рыхления почвы между кустами в рядах ягодных культур

При движении рабочего органа вдоль ряда ягодных культур рыхлительные зубья, двигаясь последовательно по траектории удлиненной циклоиды, плавно входят в пространство между кустами растений и взрыхляют почву в зоне обработки за один проход.

Заключение

Разработана усовершенствованная схема рабочего органа для рыхления почвы в рядах между кустами ягодных культур. Представлена зависимость ширины петли удлиненной циклоиды и длины участка обработки почвы

от расстояния между кустами растений для определения необходимого количества рыхлительных зубьев на дуге окружности кругового сектора. Получено выражение, определяющее угловую меру кругового сектора. Обоснованы минимальный и эффективный радиус вращения рыхлительных зубьев на дуге окружности кругового сектора.

Литература

1. Гордеев О.В. Проблемы обработки почвы между кустами ягодных культур и в частности смородины черной // Проблемы научного обеспечения садоводства и картофелеводства: сборник трудов научно-практической конференции, посвященной 85-летию ФГБНУ ЮУНИИСК. ФГБНУ «Южно-Уральский научно-исследовательский институт садоводства и картофелеводства», 2016. С. 193–195.
2. Система производства, переработки и доведения до потребителя ягод в нечерноземной зоне России / под общ. ред. члена-корреспондента РАСХН И.М. Куликова. М.: ВСТИСП, 2005. 172 с.
3. Ильин В.С. Смородина. Челябинск: Юж.-Урал. кн. изд., 2007. 195 с.
4. Пилюгин Л.М., Клименко В.И., Матвеев В.А. Культиватор для одновременной обработки почвы в междурядьях и в рядах древесных культур и ягодных кустарников: а.с. №148618, СССР. Опубликовано 1962. Бюл. № 13.
5. Наумов В.А. Приспособление к виноградным плугам-культиваторам для межкустовой обработки почвы: а.с. №145396, СССР. Опубликовано 1962. Бюл. № 5.
6. Гордеев О.В., Гордеев В.О. Рабочий орган для рыхления почвы в рядке между кустами ягодных культур // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 8. С. 3–7.
7. Гордеев О.В., Гордеев В.О. Приспособление для межкустовой обработки почвы: патент на полезную модель RUS 177 760 Опубликовано 12.03.2018. Бюл. № 8.
8. Босой Е.С., Верняев О.В., Смирнов И.И., Султан-Шах Е.Г. Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин: учебник для вузов сельскохозяйственного машиностроения / под ред. Е.С. Босого. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. 568 с.

References

1. Gordeev O.V. Problems of tillage between berry bushes and in particular black currant. Problemy nauchnogo obespecheniya sadovodstva i kartofelevodstva: sbornik trudov nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 85-letiyu FGBNU YUUNIISK [Problems of scientific support of horticulture and potato growing: a collection of works of the scientific-practical conference dedicated to the 85th anniversary of the FGBNU YUNIISK]. FGBNU «YUzhno-Ural'skij nauchno-issledovatel'skij institut sadovodstva i kartofelevodstva» Publ.. 2016, pp. 193–195 (in Russ.).
2. Sistema proizvodstva, pererabotki i dovedeniya do potrebitelya yagod v nechernozemnoj zone Rossii [The system of production, processing and bringing to the consumer berries in the non-black-earth zone of Russia]. Pod obshch. red. chlena-korrespondenta RASKHN I.M. Kulikova. Moscow: VSTISP Publ. 2005. 172 p.
3. Il'in V.S. Smorodina [Currant]. CHelyabinsk: YUzh.-Ural. kn. izd. Publ. 2007. 195 p.
4. Pilyugin L.M., Klimenko V.I., Matveev V.A. Kul'tivator dlya odnovennoy obrabotki pochvy v mezhduryad'yah i v ryadkah drevesnyh kul'tur i yagodnyh kustarnikov [Cultivator for simultaneous tillage in between rows and in rows of tree crops and berry bushes]: a.s. No 148618, SSSR. Opublikovano 1962. Byul. No 13.
5. Naumov V.A. Prispособlenie k vinogradnym plugam-kul'tivatoram dlya mezhkustovoy obrabotki pochvy [Adaptation to grape cultivators for inter-bush soil cultivation]: a.s. No 145396, SSSR. Opublikovano 1962. Byul. No 5.
6. Gordeev O.V., Gordeev V.O. Working tool for loosening the soil in a row between bushes of berry crops. Traktory i sel'hozmashiny. 2017. No 8, pp. 3–7 (in Russ.).
7. Gordeev O.V., Gordeev V.O. Prispособlenie dlya mezhkustovoy obrabotki pochvy [Device for inter-bush tillage]: patent na poleznuyu model' RUS 177 760 Opublikovano 12.03.2018. Byul. No 8.
8. Bosoj E.S., Vernyaev O.V., Smirnov I.I., Sultan-SHah E.G. Teoriya, konstrukciya i raschet sel'skohozyajstvennyh mashin [Theory, design and calculation of agricultural machinery]: Uchebnik dlya vuzov sel'skohozyajstvennogo mashinostroeniya. Pod red. E.S. Bosogo. 2-e izd., pererab. i dop. Moscow: Mashinostroenie Publ. 1977. 568 p.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СИЛОВЫХ ПЕРЕДАЧ И ХОДОВЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

QUALITY CONTROL OF POWER TRANSMISSIONS AND UNDERCARRIAGE SYSTEMS USING DIGITAL TECHNOLOGY

Н.А. ПЕТРИЩЕВ¹, к.т.н.
А.В. ЛАВРОВ¹, к.т.н.
Н.С. КРЮКОВСКАЯ¹
А.О. КАПУСТКИН¹
А.С. САЯПИН¹
А.П. ПОСПЕЛОВ¹
В.И. ПРЯДКИН², д.т.н.

¹ Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Москва, Россия

² Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия, robotchch@gmail.com

N.A. PETRISHCHEV¹, PhD in Engineering
A.V. LAVROV¹, PhD in Engineering
N.S. KRYUKOVSKAYA¹
A.O. KAPUSTKIN¹
A.S. SAYAPIN¹
A.P. POSPELOV¹
V.I. PRYADKIN², DSc in Engineering

¹ Federal State Budgetary Institution «Federal Scientific Agroengineering Center VIM», Moscow, Russia

² G.F. Morozov Voronezh State Forestry University, Voronezh, Russia, robotchch@gmail.com

Нарушение технического состояния трансмиссии и ходовых систем приводит к эксплуатационным и экономическим издержкам, нарушению технических показателей мобильных энергосредств, заложенных заводом-изготовителем. Также это оказывает негативное влияние на окружающую среду. В настоящее время лишь единичные отечественные и зарубежные компании оснастили выпускаемую технику цифровыми системами контроля технического состояния силовых передач и ходовых систем, да и то по одному или нескольким параметрам. Это системы, измеряющие уровень буксования колес трактора, температуру и давление в шинах, углы наклона трактора, а также системы, контролирующие оптимальность преобразования мощности двигателя в тяговое усилие. Основная же масса тракторов не имеет никакой системы контроля в процессе эксплуатации, и диагностика узлов и агрегатов трансмиссии и ходовых систем осуществляется трактористом «на глаз», опираясь на свой опыт и добросовестность. Это достаточно часто приводит к злостным нарушениям, и техника работает в режимах и при нагрузках, близких к возникновению отказа. Поэтому необходимо внедрение в конструкцию техники современной комплексной системы контроля состояния силовых передач и ходовых систем, основанную на применении цифровых технологий. В качестве эксперимента был разработан макетный образец такой системы контроля, включающий различные датчики, как встроенные, так и внешние, аппаратную часть микроконтроллерной платформы Arduino, а также широкодоступные приложения для смартфона, позволяющие измерять и выводить на его экран необходимую информацию о текущем состоянии агрегатов и узлов. Смартфон при этом предполагается крепить в кабине трактора. Были проведены испытания макетного образца, которые можно считать успешными. Поэтому в перспективе планируется расширить его функциональность и дополнить элементами.

Ключевые слова: контроль качества эксплуатации, контрольно-диагностическое оборудование, плодородие почвы, буксование, трансмиссия, ходовая часть.

Violation of the technical condition of the transmission and running systems leads to operational and economic costs, violation of the technical indicators of mobile power tools laid down by the manufacturer. It also has a negative impact on the environment. At present, only a few domestic and foreign companies have equipped the equipment they produce with digital systems for monitoring the technical condition of power transmissions and running systems, and even then by one or several parameters. These are systems that measure the level of wheel slippage of the tractor, the temperature and pressure in the tires, the angle of inclination of the tractor, as well as the systems that control the optimality of the conversion of engine power to tractive force. The main mass of tractors has no control system during operation and diagnostics of components and assemblies of the transmission and chassis systems is carried out by the tractor operator «by eye», based on his experience and fairness. This often leads to serious violations and equipment operates in modes and loads close to failure. Therefore, it is necessary to introduce into the design of modern technology integrated system for monitoring the state of power transmission and running systems, based on the use of digital technologies. As an experiment, a prototype model of such a control system was developed, including various sensors, both embedded and external, the hardware of the Arduino microcontroller platform, as well as widely available applications for the smartphone, allowing to measure and display on the screen the necessary information about the current state of the units and components. The smartphone is supposed to be mounted in the cab of the tractor. The prototype was tested and can be considered successful. Therefore, in the future it is planned to expand its functionality and add elements.

Keywords: quality control of operation, control and diagnostic equipment, soil fertility, skidding, transmission, running gear.

Введение

При нарушении технического состояния трансмиссии и ходовых систем сельскохозяйственных мобильных энергетических средств (МЭС):

- снижаются их экологические и технические характеристики, заложенные заводом-изготовителем;

- появляются эксплуатационные издержки (увеличение вероятности отказов и аварий, рост потребления горюче-смазочных материалов и т.п.);

- появляются экономические издержки (увеличение продолжительности, снижение качества и повышение себестоимости выполнения работ);

- нарушаются экологические показатели (переуплотнение почвы, увеличение количества выбросов отработанных газов в атмосферу) [1].

При использовании колесных тракторов на мягких и влажных почвах наблюдается повышенное буксование. При этом разрушается структура почвы, что приводит к эрозии и потере верхнего плодородного слоя, снижаются производительность и тяговые характеристики трактора, увеличивается расход топлива. Кроме этого, буксование оказывает негативное влияние на техническое состояние трактора. Поэтому ранней весной применение колесных тракторов на полевых работах затруднено или вообще не представляется возможным. Уровень буксования также оказывает влияние на параметры движения агрегатов при различных видах работ и на ресурс рабочих органов.

Для экспериментального определения величины буксования МЭС (при отсутствии экспериментальных средств контроля) считают число оборотов его ведущих колес с тяговой нагрузкой и без нее (на холостом ходу) на мерном участке поля. Однако при этом не учитываются особенности структуры почвы и рельефа местности, что ограничивает применение этого метода на практике.

Цель исследования

Целью проведенных исследований является обоснование необходимости внедрять в технику отечественного производства современные цифровые системы контроля технического состояния силовых передач и ходовых систем.

Обсуждение результатов исследования

С целью определения величины буксования при тяговых испытаниях в исследовательских целях также применяется дополнительное независимое путеизмерительное колесо. Его используют для получения значений действительной скорости и пройденного пути [2, 3, 4, 5, 6].

В табл. 1 представлены значения допустимой величины буксования согласно агротехнологическим требованиям в зависимости от типа движителя трактора.

Таблица 1

Значения допустимой величины буксования согласно агротехнологическим требованиям в зависимости от типа движителя трактора

Тип движителя трактора	Допустимая величина буксования, %
Колесный 4X4	16
Колесный 4X2	14
Гусеничный	5

На тракторе КАМАЗ СХ75 была внедрена цифровая система контроля буксования для оперативного реагирования водителем. Она представляет собой цифровой дисплей (рис. 1) и датчик определения фактической скорости движения трактора относительно поверхности грунта. Ее применение способствует снижению перерасхода семян при посеве, а также уменьшению количества избыточных удобрений и химических веществ против сорняков и вредителей. На дисплее отображается скольжение

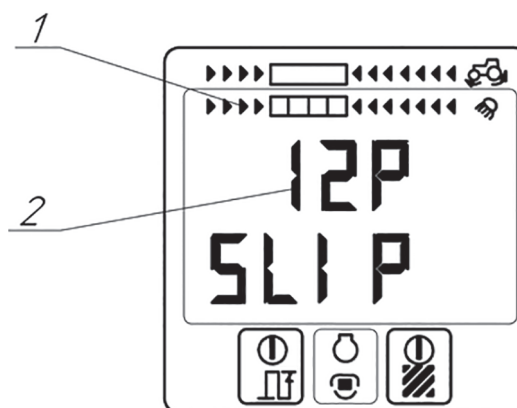


Рис. 1. Индикатор скольжения колес трактора КАМАЗ СХ75:

- 1 – столбчатая диаграмма скольжения колес;
- 2 – числовое значение скольжения колес в процентах

колес в режиме реального времени при движении трактора в виде столбиковой диаграммы, содержащей 15 сегментов. Каждый сегмент соответствует двухпроцентному скольжению. Таким образом, диапазон определения буксования составляет от 0 до 30 %. Кроме этого, величину скольжения колес можно определить в численном виде. Это значение отображается в центре дисплея в процентах.

Согласно рекомендациям производителя трактора КАМАЗ СХ75, допустимым значением скольжения колес является 9–16 %. Буксование свыше этих значений приводит к потерям мощности трактора до 30 % [7, 8].

Некоторые производители МЭС применяют балластирование для снижения буксования. Однако при этом увеличивается сопротивление качению из-за погружения шин в почву, под действием добавленного веса, что также приводит к потерям мощности двигателя и увеличению расхода топлива. Так, при погружении колес в грунт на 1 см увеличение расхода топлива составляет 10 %. Поэтому компания Fendt производит тракторы, сочетающие малый вес и высокую энерговооруженность для снижения глубины колеи и минимизации «эффекта бульдозера» (рис. 2). Кроме этого, компанией Fendt была внедрена система элек-

тронного управления, преобразующая мощность двигателя в тяговое усилие наиболее оптимально и позволяющая эффективно передавать мощность двигателя на рабочие орудия, снижать повреждения почвы и экономить топливо.

Для увеличения площади контакта колес с почвой и снижения глубины колеи компания использует функцию VarioGrip, позволяющую дистанционно изменять уровень давления в шинах [9].

Стоит отметить, что эта технология была реализована на отечественной колесной технике военного назначения более полувека назад. Однако из-за особенностей конструкции ведущих мостов отечественных тракторов в них подобная система пока не применяется. В табл. 2 представлены рекомендуемые значения давления в шинах в зависимости от типа работ [10].

При отсутствии системы контроля давления в шинах и превышения предельных углов наклона трактора (крена и тангажа) в режиме реального времени может возникнуть кинематическая рассогласованность передачи крутящего момента на движители, что способствует дополнительным перегрузкам трансмиссии и ходовой системы и, как следствие, снижению

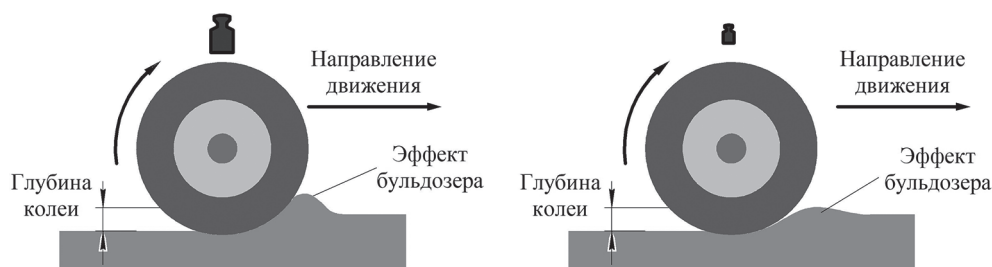


Рис. 2. Минимизация «эффекта бульдозера» за счет использования электронной системы управления трансмиссией и ходовой системой

Таблица 2

Рекомендуемые значения давления в шинах в зависимости от типа работ [10]

Трактор	Сельскохозяйственные работы		Транспортные работы	
	$P_{ш1}$, МПа	$P_{ш2}$, МПа	$P_{ш1}$, МПа	$P_{ш2}$, МПа
Т-25	0,14	0,08	0,34	0,20
Т-16М	0,14	0,08	0,34	0,20
Т-40М	0,14	0,10	0,30	0,16
МТЗ-80	0,14	0,12	0,25	0,17
МТЗ-82	0,12	0,08	0,25	0,16
Т-150К	0,12	0,10	0,16	0,12
К-701	0,11	0,11	0,12	0,12

их ресурса и преждевременному выходу из строя. Кроме того, отсутствие системы контроля превышения предельных углов наклона трактора приводит к нарушению техники безопасности и «масляному голоданию» узлов трансмиссии и двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в связи с нарушением стабильности поступления масла из поддона картера. В результате поверхности фрикционных дисков, дифференциалов главных передач и др. локально перегреваются, приводя к нарушению допусков и посадок сопрягаемых деталей, изменению геометрии, свойств применяемых материалов и рабочей жидкости, нарушению теплового баланса работы агрегата, образованию лаковых и оксидных пленок. Лаковые и оксидные пленки способствуют снижению коэффициента трения фрикционов, загрязнению фильтроэлементов, ухудшают теплопередачу. Все это приводит к изменению свойств материалов, заложенных производителем, таких как твердость, шероховатость, коэффициент трения и т.п. На рис. 3 показаны анализ цветов побежалости и определение зон минимального и максимального локального перегрева вала автоматической коробки перемены передач (АКПП).

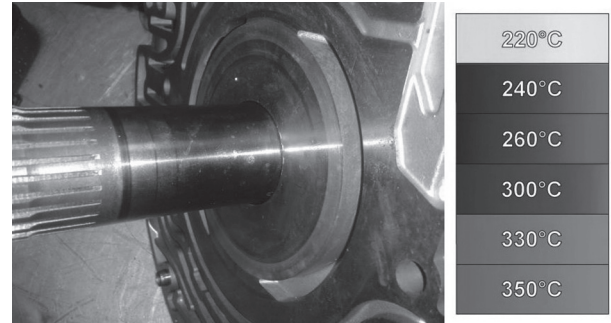


Рис. 3. Определение зон минимального и максимального локального перегрева вала АКПП на основе анализа цветов побежалости

Компания AMAZONE рекомендует контролировать температуру в шинах, так как изменение температуры в одной из шин в процессе движения может быть связано с проблемами в ходовой или тормозной системе.

Таким образом, применение цифровых технологий для контроля технического состояния силовых передач и ходовых систем МЭС позволяет предупредить их отказы в случае зафиксированной угрозы эксплуатации при аномальных режимах. Учитывая это, разработан макетный образец системы контроля текущего состояния агрегатов (рис. 4) силовых передач и ходовых систем. Он включает в себя различ-

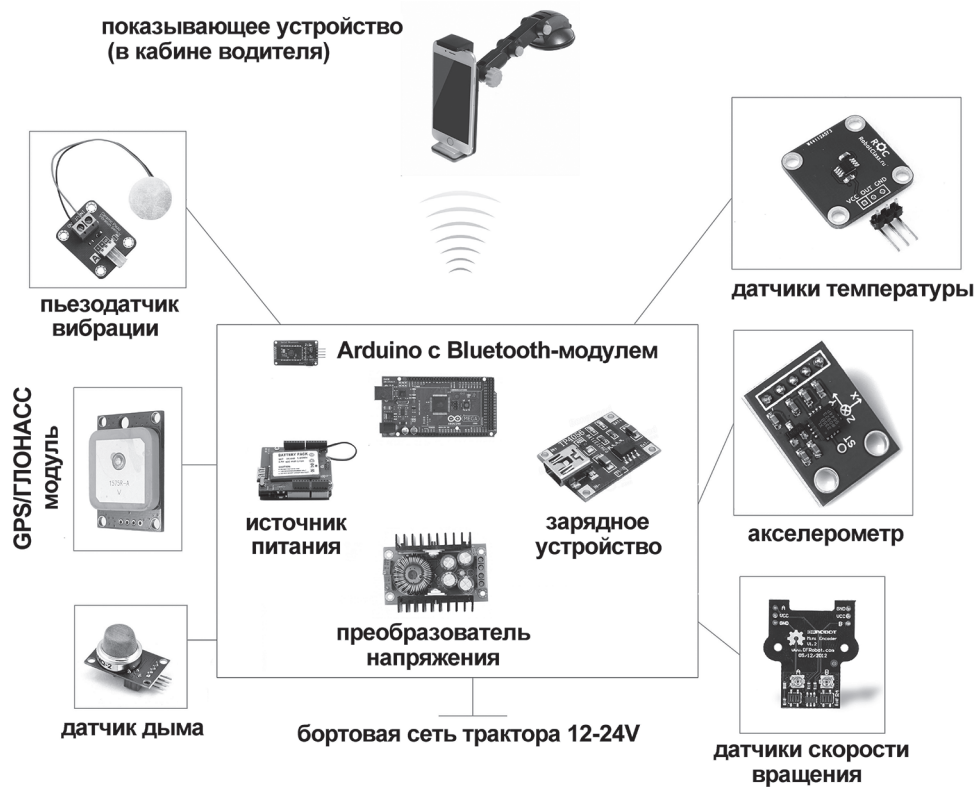


Рис. 4. Макетный образец системы контроля силовых передач

ные датчики, как встроенные, так и внешние, в том числе с использованием Bluetooth Low Energy (BLE), аппаратную часть микроконтроллерной платформы Arduino, а также широкодоступные приложения для смартфона, устанавливаемого в кабине трактора [11].

Так, для контроля температуры и давления в шинах трактора применялись набор BLE-датчиков и бесплатное приложение к смартфону BLE TMPS (рис. 5, а). С использованием показаний, отображаемых на экране смартфона и с учетом режима работы (табл. 2), оператор может оперативно настроить и проконтролировать состояние шин на соответствие требованиям завода-производителя.

С помощью приложения для смартфона Inclinometer, speedometer free определялся крен и тангаж. При достижении критического значения углов оператор получал сигнал (рис. 5, б).

Для определения линейных и угловых ускорений трактора при разгоне, торможении, рывках, галошировании при буксовании использовали приложение Sensor kinetics pro.

Оно позволяет просматривать и сохранять данные гироскопа, акселерометра и информацию с других встроенных в смартфон датчиков (рис. 5, в), отправлять информацию на электронную почту пользователя через интернет. При этом файлы данных возможно открыть в любой программе электронных таблиц.

Конечно, предложенный макетный образец системы контроля силовых передач и ходовых систем пока еще не совершенен, и требуются дальнейшие работы и исследования в этом направлении. Однако, очевидно, что применение современных цифровых систем контроля позволит повысить надежность, эргономичность и экономичность выпускаемой техники отечественного производства. В перспективе представленный макетный образец системы контроля планируется дополнить элементами, позволяющими контролировать уровень нагрузки на оси МЭС, разницу по глубине колеи, состояние воздушного фильтра ДВС, микроклимата в кабине, индикация и предупреждение о препятствии на расстоянии до 20 метров.

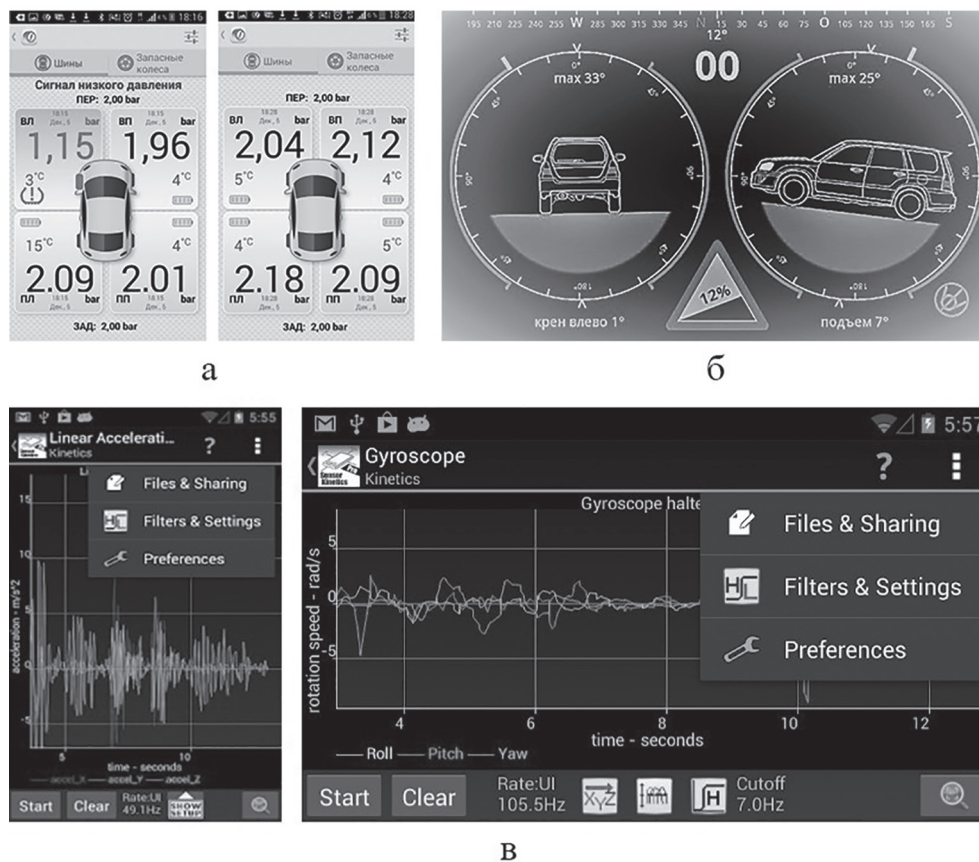


Рис. 5. Показания на экране смартфона:

а – контроль температуры и давления в шинах; б – определение углов крена и тангажа;

в – визуализация процесса при оценке линейных и угловых ускорений

Выводы

При диагностировании узлов и агрегатов силовых передач и ходовых систем МЭС в процессе технического обслуживания все большее значение приобретают работы по выявлению их фактического состояния. Однако узлы и агрегаты силовых передач и ходовых систем мало приспособлены к проведению диагностики, что оказывает влияние на достоверность полученных данных, и возникает необходимость проведения дополнительных сервисных воздействий.

Методика комплексной оценки качества эксплуатации и технического состояния силовых передач и ходовых систем для конкретных условий и режимов эксплуатации (соблюдение норм техники безопасности, соответствие техническим требованиям и рекомендациям заводов-изготовителей МЭС, соблюдение агротехнических требований и регламентов организации, использующей МЭС) в настоящее время отсутствует.

Контроль качества силовых передач и ходовых систем в процессе эксплуатации отечественной техники осуществляется исключительно трактористом-машинистом исходя из его опыта и добросовестности, что порою приводит к злостным нарушениям в процессе эксплуатации. Агрегаты трансмиссии и ходовой части работают в режимах, близких к отказу.

Для исключения аварийных условий эксплуатации требуется внедрять в технику отечественного производства современные цифровые системы контроля технического состояния силовых передач и ходовых систем, а также сигнализирующие устройства для предупреждения оператора о необходимости изменения стиля вождения и режимов эксплуатации.

Литература

1. Дорохов А.С., Семейкин В.А. Входной контроль качества продукции машиностроения // Сельский механизатор. 2013. № 11. С. 22–23.
2. Кузнецов Н.Г., Гапич Д.С., Ширяева Е.В. К вопросу об определении допустимого коэффициента буксования полноприводного колесного трактора // Известия нижевожского агроинженерного комплекса. 2014. № 2 (34). С. 89–92.
3. Максимов Е.А. Предпосылки для создания устройства для ограничения буксования двигателей трактора // Сборник научных трудов СЗНИИМЭСХ. 1999. № 70. С. 22–26.
4. Годжаев З.А., Измайлов А.Ю., Шевцов В.Г., Лавров А.В., Русанов А.В. Исследование давления колесного движителя на почву с учетом характеристики шины // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. № 1. С. 5–10.
5. Коновалов Д.Н., Коновалова М.В. Анализ методов улучшения тягово-сцепных качеств и снижения буксования колесных движителей мобильных сельскохозяйственных агрегатов // Научно-методический электронный журнал «Концепт». 2017. Т. 39. С. 1461–1465. URL: <http://e-koncept.ru/2017/970619.htm> (дата обращения 14.09.2018).
6. Новиков В.С. Методика расчета почворезущих рабочих органов на долговечность // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ, серия «Агроинженерия». 2008. № 2. С. 87–99.
7. Петровский Д.И., Петрищев Н.А. К вопросу обеспечения долговечности плуга // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 127. С. 184–189.
8. Трактор Камаз CX75. Индикатор скольжения колес [Электронный ресурс]. URL: http://cinref.ru/avtomobili/Kamaz/110_traktor_kamaz_cx75/015.htm (дата обращения 15.09.2018).
9. Качество сцепления и защита почвы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fendt.com/ru/3936.html> (дата обращения 15.09.2018).
10. Савочкин В.А. Тяговый расчет трактора. М.: МГТУ «МАМИ», 2001. 48 с.
11. Петрищев Н.А., Хисметов Н.З., Саяпин А.С. Применение инженерных приложений мобильных устройств при сервисе сельскохозяйственной техники // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. 2016. № 4. С. 17–24.

References

1. Dorohov A.S., Semejkin V. A. Input quality control of engineering products. Sel'skij mekhanizator. 2013. No 11, pp. 22–23 (in Russ.).
2. Kuznecov N.G., Gapich D.S., SHiryayeva E.V. The question of determining the permissible coefficient of slipping of an all-wheel-drive wheeled tractor. Izvestiya nizhnevolzhskogo agroinzhenernogo kompleksa. 2014. No 2 (34), pp. 89–92 (in Russ.).
3. Maksimov E.A. Prerequisites for creating a device for limiting the slipping of the tractor thrusters. Sbornik nauchnyh trudov SZNIIMENSKH. 1999. No 70, pp. 22–26 (in Russ.).
4. Godzhaev Z.A., Izmajlov A.YU., SHEvcov V.G., Lavrov A.V., Rusanov A.V. Study of the pressure of the wheel propulsion on the soil, taking into account the characteristics of the tire. Sel'skohozyajstvennye mashiny i tekhnologii. 2016. No 1, pp. 5–10 (in Russ.).

5. Konovalov D. N., Konovalova M. V. Analysis of methods for improving the traction characteristics and reducing the slipping of the wheel propulsion of mobile agricultural units. Nauchno-metodicheskij ehlektronnyj zhurnal «Koncept». 2017. Vol. 39, pp. 1461–1465 (in Russ.). URL: <http://e-koncept.ru/2017/970619.htm> (data obrashcheniya 14.09.2018).
6. Novikov B.C. Method of calculating the soil-cutting working tools for durability. Vestnik FGOU VPO MGAU, seriya «Agroinzheneriya». 2008. No 2, pp. 87–99 (in Russ.).
7. Petrovskij D.I., Petrishchev N.A. The issue of ensuring the durability of the plow. Trudy GOSNITI. 2017. Vol. 127, pp. 184–189 (in Russ.).
8. Traktor Kamaz SKH75. Indikator skol'zheniya kolyos [Kamaz CX75 tractor. Wheel slip indicator] [EHlektronnyj resurs]. URL: http://cinref.ru/avtomobili/Kamaz/110_traktor_kamaz_cx75/015.htm (data obrashcheniya 15.09.2018).
9. Kachestvo scepleniya i zashchita pochvy [Traction quality and soil protection] [EHlektronnyj resurs] URL: <https://www.fendt.com/ru/3936.html> (data obrashcheniya 15.09.2018).
10. Savochkin V.A. Tyagovyj raschet traktora [Traction tractor calculation]. Moscow: MGTU «MAMI» Publ., 2001. 48 p.
11. Petrishchev N.A., Hismetov N.Z., Sayapin A.S. The use of engineering applications of mobile devices in the service of agricultural machinery. Sel'skhoz'yajstvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont. 2016. No 4, pp. 17–24 (in Russ.).

ОБОСНОВАНИЕ ПОТРЕБНОГО КОЛИЧЕСТВА ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ КОМБАЙНОВОЙ УБОРКЕ КАПУСТЫ

JUSTIFICATION OF REQUIRED NUMBER OF VEHICLES WHEN COMBINED CABBAGE CLEANING

С.С. АЛАТЫРЕВ¹, д.т.н.
И.С. КРУЧИНКИНА¹, к.т.н.
А.С. АЛАТЫРЕВ¹, к.т.н.
Д.И. ФЕДОРОВ², к.т.н.

¹ Чувашская государственная сельскохозяйственная академия, Чебоксары, Россия

² Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета, Чебоксары, Россия, S_Alatyrev1955@mail.ru

S.S. ALATYREV¹, DSc in Engineering
I.S. CRUCHINKINA¹, PhD in Engineering
A.S. ALATYREV¹, PhD in Engineering
D.I. FEDOROV², PhD in Engineering

¹ Chuvash State Agricultural Academy, Cheboksary, Russia

² The Cheboksary Institute (branch) of the Moscow Polytechnic University, Cheboksary, Russia, S_Alatyrev1955@mail.ru

При комбайновой уборке кочанной капусты транспортирование продукции с поля в овощехранилище осуществляется преимущественно в кузове транспортного средства навалом или в контейнерах. В первом случае в овощехранилище транспортные средства разгружаются вручную, а во втором случае – с помощью вилочного электропогрузчика. При этом транспортные средства значительно простаивают на разгрузке продукции, особенно в первом случае. В этой связи в целях оценки качества обслуживания транспортных средств смоделирован процесс их разгрузки, используя теорию массового обслуживания. Описана суть происходящих явлений и проведены расчеты показателей качества функционирования системы обслуживания транспортных средств в овощехранилище при доставке продукции навалом и в контейнерах, а также сформулированы рекомендации по ее рациональной организации. С учетом рациональной организации системы обслуживания транспортных средств на разгрузке обосновано их потребное количество в рассмотренных случаях.

Ключевые слова: машинная уборка капусты, моделирование процессов, система массового обслуживания, потребное количество транспортных средств.

During combine harvesting of cabbage, products are transported from the field to the vegetable store mainly in the body of the vehicle in bulk or in containers. In the first case in the place where vegetable vehicles are unloaded manually, and in the second case – using a forklift. At the same time, vehicles are significantly idle while unloading vegetables, especially in the first case. In this regard, in order to assess the quality of service of vehicles, the process of unloading them is modeled using the queuing theory. The essence of the occurring phenomena is described and the indicators of the quality of functioning of the vehicle maintenance system in the vegetable storehouse during the delivery of products in bulk and in containers are calculated, and recommendations on its rational organization are formulated. Taking into account the rational organization of the vehicle servicing system on unloading, their required quantity in the considered cases is justified.

Keywords: of cabbage heads by machine-harvesting, process modeling, queuing system, required number of vehicles.

Введение

При комбайновой уборке кочанной капусты транспортирование продукции с поля в овощехранилище осуществляется преимущественно тракторными транспортными средствами, поскольку они обладают более высокой проходимостью в условиях повышенной влажности по сравнению с автомобильным транспортом и лучше согласуются со скоростью уборочного агрегата. При этом в зависимости от хозяйственных и агротехнологических условий уборочно-транспортный процесс может быть организован по разным технологическим схемам [1–5], например:

- комбайновая уборка отгрузкой кочанов навалом в кузов сопровождающего тракторного транспортного средства (рис. 1) [5];

- комбайновая уборка отгрузкой кочанов сначала на гибкий настил, установленный на стойках в кузове тракторного транспортного средства над контейнерами, а затем переключением их в контейнеры (рис. 2) [6, 7].

При уборке капусты по первой схеме разгрузка транспортных средств в овощехранилище производится вручную, так как выгрузка

самосвалом сопровождается значительными механическими повреждениями кочанов.

Во втором случае капуста поступает в овощехранилище в контейнерах, которые снимают с кузова транспортного средства, оставляя гибкий настил со стойками в нем же, и устанавливают в штабелях в овощехранилище вилочным электропогрузчиком [8]. Этим же электропогрузчиком устанавливают в кузове транспортного средства вместо снятых груженых контейнеров пустые.

Заметим, в описанных схемах уборки капусты, особенно в первой, транспортные средства значительно простаивают на разгрузке продукции в овощехранилище. В результате чего уборочные агрегаты вынуждены простаивать на поле в ожидании возврата транспортных средств, так как уборка капусты производится при непосредственном сопровождении ими.

Цель исследований

Изучить суть происходящих явлений при обслуживании транспортных средств на разгрузке продукции и обосновать на этой основе их потребное количество для обеспечения бесперебойной работы капустоуборочного комбайна.

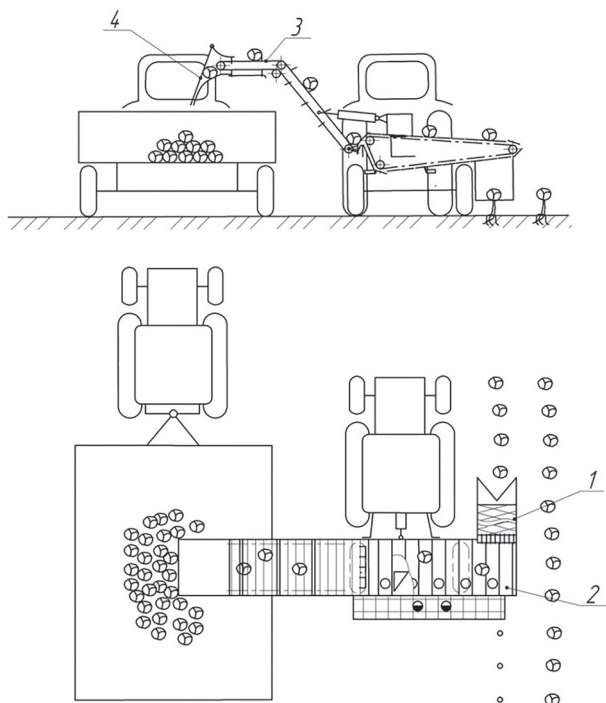


Рис. 1. Уборка капусты комбайном по схеме отгрузки кочанов навалом в кузов тракторного транспортного средства:

1 – режущий аппарат; 2 – стол доработки;
3 – элеватор; 4 – устройство для отгрузки кочанов в щадящем режиме

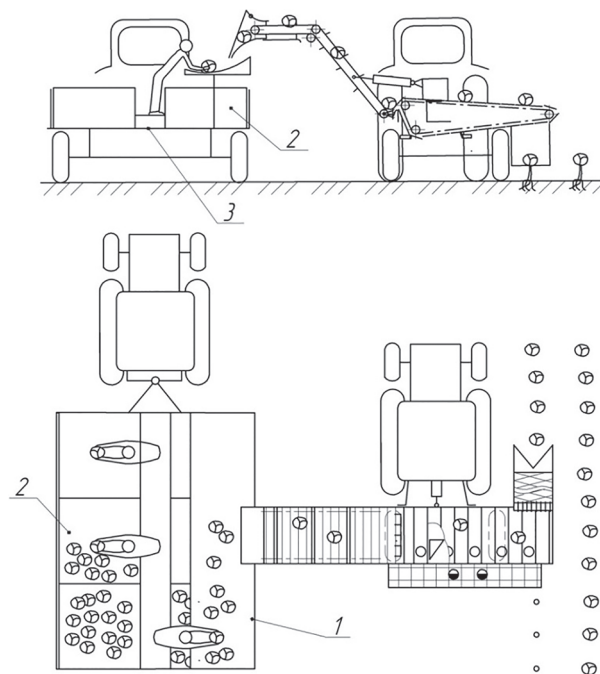


Рис. 2. Уборка капусты комбайном по схеме отгрузки кочанов на гибкий настил с последующей бережной укладкой в контейнеры, установленные в кузове тракторного транспортного средства:

1 – гибкий настил на стойках;
2 – контейнеры; 3 – кузов

Для достижения поставленной цели необходимо:

- смоделировать процессы обслуживания транспортных средств в овощехранилище при описанных выше схемах уборки капусты;
- установить качественные показатели обслуживания транспортных средств на разгрузке продукции для принятия рациональных решений при обосновании потребного количества транспортных средств.

Материалы и методы исследования

Процесс обслуживания транспортных средств в овощехранилище на разгрузке продукции, на наш взгляд, может быть успешно исследован по обеим схемам как система массового обслуживания (далее СМО), так как поступление потока транспортных средств на разгрузку в овощехранилище, процесс разгрузки продукции можно рассматривать как многократное выполнение однотипных задач.

Рассматриваемая СМО в общем случае может быть исследована как многоканальная система [9]. Так, при ручной разгрузке транспортных средств бригады грузчиков можно считать каналами системы, а поток поступающих транспортных средств с интенсивностью λ – интенсивностью заявок, интенсивность разгрузки – интенсивностью обслуживания μ каналов.

При этом транспортные средства, не имеющие возможности обслуживания в сию минуту из-за занятости обслуживающих бригад грузчиков или вилочных электропогрузчиков (каналов СМО), находятся в ожидании обслуживания на площадке перед овощехранилищем. Для того, чтобы система эффективно функционировала, отказов в обслуживании практически не должно быть, режим должен быть установившимся, то есть очередь не должна бесконечно возрастать.

Интенсивность входящего потока заявок при уборке кочанной капусты одним убороч-

ным агрегатом может быть определена исходя из производительности комбайна W (га/час), урожайности капусты Y (т/га) грузоподъемности прицепа Q (т) тракторного транспортного средства согласно выражению:

$$\lambda = \frac{WY}{Q}.$$

При $W = 0,2...0,3$ га/час, $Y = 30...40$ т/га, $Q = 4$ т интенсивность входящего потока составит $\lambda = 1,5...3$ час⁻¹.

Интенсивность обслуживания канала может быть найдена исходя из времени разгрузки t транспортного средства по формуле:

$$\mu = \frac{1}{t}.$$

При времени разгрузки одного тракторного прицепа вручную бригадой грузчиков $t' = 0,75$ час и электропогрузчиком $t'' = 0,25$ час при доставке продукции в контейнерах интенсивности обслуживания, соответственно, равны: $\mu' = 1,33$ час⁻¹, $\mu'' = 4$ час⁻¹.

В рассматриваемой СМО возможны разные состояния. Возможные состояния системы обозначим исходя из числа занятых каналов и числа заявок в очереди:

S_0 – все каналы (бригады грузчиков или электропогрузчики) свободны;

S_1 – занят один канал, остальные свободны;

S_k – заняты k каналов, остальные свободны;

S_n – заняты все n каналов;

S_{n+1} – заняты все n каналов, одна заявка стоит в очереди;

S_{k+r} – заняты все n каналов, r заявок стоят в очереди.

Считая вместимость площадки перед овощехранилищем достаточной, длину очереди r не ограничиваем. Тогда граф состояний будет бесконечным (рис. 3) [9].

В данном случае выражения для предельных вероятностей состояний системы можно представить в виде [10]:

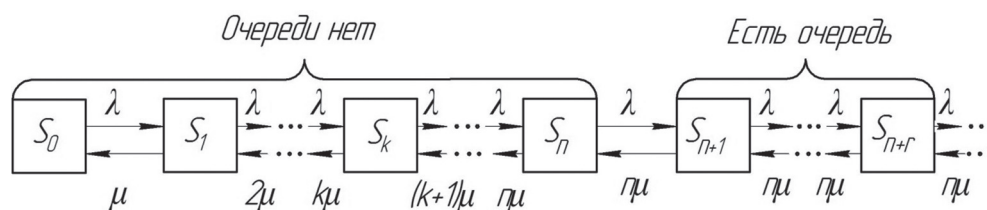


Рис. 3. Граф состояний СМО обслуживания транспортных средств на разгрузке продукции при машинной уборке капусты

$$P_0 = \left[1 + \frac{\rho}{1!} + \frac{\rho^2}{2!} + \dots + \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)} \right]^{-1};$$

$$P_1 = \frac{\rho}{1!} P_0;$$

$$P_2 = \frac{\rho^2}{2!} P_0;$$

$$P_n = \frac{\rho^n}{n!} P_0;$$

$$P_{n+1} = \frac{\rho^{n+1}}{n!} P_0;$$

$$P_{n+2} = \frac{\rho^{n+2}}{n^2 n!} P_0;$$

.....

$$P_{n+r} = \frac{\rho^{n+r}}{n^r n!} P_0$$

.....

– абсолютная пропускная способность

$$A = \lambda q = \lambda. \tag{2}$$

При этом показатели СМО определяются по соответствующим формулам [10]:

– среднее число заявок (транспортных средств), ожидающих обслуживания

$$\bar{r} = \frac{\rho^{n+1} P_0}{n \cdot n!(1-\chi)^2}; \tag{3}$$

– среднее время ожидания транспортного средства в очереди

$$\bar{t}_{ож} = \frac{\rho^n P_0}{n \mu n!(1-\chi)^2}; \tag{4}$$

– среднее время пребывания транспортного средства в системе

$$\bar{t}_{сист} = \bar{t}_{ож} + q \bar{t}_{об}; \tag{5}$$

– среднее число занятых каналов

$$\bar{z} = \frac{A}{\mu} = \frac{\lambda}{\mu} = \rho; \tag{6}$$

– вероятность отсутствия очереди в обслуживании при n каналах

$$P_{00} = P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_n. \tag{7}$$

где $\rho = \lambda / \mu$ – интенсивность нагрузки канала.

Заметим, что рассматриваемая СМО будет функционировать в установившемся режиме при $\chi = \rho / n < 1$. При $\chi \geq 1$ очередь заявок в ожидании обслуживания будет бесконечно возрастать. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только варианты, при которых $\chi < 1$. В СМО в данных вариантах каждая заявка рано или поздно будет обслужена, поэтому характеристики ее пропускной способности:

- вероятность отказа $P_{отк} = 0$;
- относительная пропускная способность системы $q = 1 - P_{отк} = 1$,

Результаты исследований и обсуждение

Результаты расчетов показателей эффективности функционирования рассматриваемых СМО, полученные по формулам (1)–(7) при $\lambda = 2,25$, $\mu' = 1,33$ час⁻¹ и $\mu'' = 4$ час⁻¹, представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Показатели эффективности функционирования СМО разгрузки транспортных средств при доставке кочанов капусты в овощехранилище навалом (при $\chi < 1$)

Число каналов СМО (число бригад грузчиков) n'	Показатели СМО						
	P'_0	P'_{00}	A'	\bar{r}'	$\bar{t}'_{ож}$, час	$\bar{t}'_{сист}$, час	\bar{z}'
2	0,084	0,346	2,25	4,219	1,88	2,63	1,59
3	0,168	0,827	2,25	0,40	0,18	0,93	1,69
4	0,181	0,951	2,25	0,078	0,03	0,78	1,69

Таблица 2

Показатели эффективности функционирования СМО разгрузки транспортных средств при доставке кочанов капусты в овощехранилище в контейнерах (при $\chi < 1$)

Число каналов СМО (число электропогрузчиков) n''	Показатели СМО						
	P''_0	P''_{00}	A''	\bar{r}''	$\bar{t}''_{ож}$, час	$\bar{t}''_{сист}$, час	\bar{z}''
1	0,440	0,69	2,25	0,314	0,14	0,39	0,56
2	0,562	0,96	2,25	0,048	0,02	0,27	0,56
3	0,570	1,00	2,25	0,00	0,00	0,25	0,56

Из приведенных таблиц видно, что заявки (транспортные средства), поступившие на вход СМО в то время, когда все каналы заняты, временно получают отказ и ожидают обслуживания в очереди. В обоих рассмотренных случаях число их уменьшается с возрастанием числа каналов. Так, при разгрузке транспортных средств вручную при $n' = 3$ среднее число ожидающих транспортных средств \bar{n}' в очереди становится меньше одного, а при поступлении кочанов в контейнерах разгрузкой транспортных средств справляется один вилочный погрузчик (среднее время ожидания составляет лишь 0,14 часа).

С учетом полученных результатов исследования можно рекомендовать число обслуживающих бригад грузчиков $n' = 3$, а необходимое количество вилочных погрузчиков $n'' = 1$. При этом простои на разгрузке продукции транспортных средств будут ниже времени обслуживания, то есть можно считать использование транспортных средств достаточно эффективным. В то же время бригады грузчиков и вилочный погрузчик достаточно плотно заняты работой (вероятности того, что все каналы свободны, соответственно, не превышают 0,168 и 0,440).

С учетом рациональных показателей функционирования СМО транспортных средств ($n' = 3$, $n'' = 1$) можно обосновать их необходимое количество.

Для этого определим продолжительность транспортного цикла по формуле:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{п}} + t_{\text{дв}} + t_{\text{сист}} + t_{\text{по}}, \quad (8)$$

где $t_{\text{п}}$ – продолжительность погрузки транспортного средства, час; $t_{\text{дв}}$ – продолжительность груженой и порожней ездки, час; $t_{\text{по}}$ – продолжительность прочих операций (взвешивание, оформление документов и т.п.), час.

Продолжительность погрузки транспортного средства

$$t_{\text{п}} = \frac{1}{\lambda}. \quad (9)$$

Продолжительность груженой и порожней ездки

$$t_{\text{дв}} = \frac{l}{k_{\text{п}} v_{\text{ср}}}, \quad (10)$$

где l – расстояние от поля до овощехранилища, км; $k_{\text{п}}$ – коэффициент использования пробега; $v_{\text{ср}}$ – среднетехническая скорость движения транспортного средства, км/час.

При этом потребное количество транспортных средств

$$N = \frac{t_{\text{ц}}}{t_{\text{п}}}.$$

Выполнив расчеты по формулам (8)–(11) при $\lambda = 2,25 \text{ час}^{-1}$, $l = 3 \text{ км}$, $k_{\text{п}} = 0,5$, $v_{\text{ср}} = 10 \text{ км/час}$, $t'_{\text{сист}} = 0,93 \text{ час}$ (при разгрузке вручную бригадами грузчиков $n' = 3$), $t''_{\text{сист}} = 0,39 \text{ часа}$ (при разгрузке одним вилочным электропогрузчиком), получим потребное количество транспортных средств, соответственно, $N' \approx 5$ и $N'' \approx 4$.

Выводы

1. Впервые проведена оценка качества обслуживания транспортных средств на разгрузке продукции при машинной уборке капусты на основе теории массового обслуживания.

2. Установлены количественные связи качественных показателей обслуживания транспортных средств на разгрузке продукции с характеристиками поступающего потока и самой системы.

3. Установлено, что при непрерывной работе комбайна по первой схеме транспортные средства будут использоваться эффективно при количестве бригад грузчиков $n' = 3$, а по второй схеме – при наличии одного вилочного электропогрузчика.

4. При среднем расстоянии перевозок $l = 3 \text{ км}$, урожайности капусты $Y = 30...40 \text{ т/га}$, производительности комбайна $W = 0,2...0,3 \text{ га/час}$ для бесперебойной работы уборочного агрегата по первой схеме в среднем необходимо задействовать 5 единиц транспортных средств, а по второй схеме – 4 единицы.

Литература

- Алатырев С.С., Кручинкина И.С., Алатырев А.С. Многовариантный капустоуборочный комбайн // Сельский механизатор. 2017. № 8. С. 12–13.
- Алатырев С.С. К выбору способа механизированной уборки капусты в современных условиях // Машинные технологии и новая сельскохозяйственная техника для условий евро-северо-востока России: материалы 2-й Международной научно-практической конференции. Киров: Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока имени Н.В. Рудницкого, 2000. С. 130–137.
- Алатырев С.С., Савеличев К.А., Алатырева И.С., Григорьев А.О. Новые технологии и техническое средство для уборки капусты // Тракторы и сель-

- скохозайственные машины. 2008. № 7. С. 16–17.
4. Алатырев С.С., Юркин А.П., Кручинкина И.С., Алатырев А.С. Производственная проверка нового способа механизированной уборки кочанной капусты // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 12. С. 3–7.
 5. Алатырев С.С., Мишин П.В., Алатырев А.С. Новый капустоуборочный комбайн // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2018. № 1. С. 102–107.
 6. Алатырев С.С., Алатырев А.С., Юркин А.П. К оценке экономической эффективности нового способа уборки кочанной капусты // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Современное состояние прикладной науки в области механики и энергетики», проводимой в рамках мероприятий, посвященных 85-летию Чувашской государственной сельскохозяйственной академии, 150-летию Русского технического общества, и приуроченной к 70-летию со дня рождения доктора технических наук, профессора, заслуженного работника высшей школы Российской Федерации Акимова Александра Петровича. Чебоксары: ФГБОУ ВО Чувашская ГСХА, 2016. С. 31–38.
 7. Алатырев С.С., Кручинкина И.С., Алатырев А.С. Аналитическое обоснование конструктивных параметров приспособления для бережной отгрузки кочанов при машинной уборке капусты // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. № 8. С. 29–34.
 8. Алатырев С.С., Юркин А.П., Воронин В.В., Кручинкина И.С., Алатырев А.С. Способ уборки кочанной капусты и устройство для его осуществления: патент на изобретение № 2554403, Российская Федерация. Опубликовано 27.06.2015. Бюл. № 3.
 9. Алатырев С.С., Мишин П.В., Кручинкина И.С., Алатырев А.С. Оптимизация процесса отгрузки и укладки кочанов в контейнеры при машинной уборке капусты в падающем режиме // Вестник КрасГАУ. 2018. № 1. С. 101–108.
 10. Вентцель Е.С. Исследование операций. М.: «Советское радио». 1972. 552 с.
- References**
1. Alatyrev S.S., Kruchinkina I.S., Alatyrev A.S. Multivariate cabbage harvester. Sel'skij mekhanizator. 2017. No 8, pp. 12–13 (in Russ.).
 2. Alatyrev S.S. The choice of the method of mechanized harvesting cabbage in modern conditions. Mashinnye tekhnologii i novaya sel'skohozyajstvennaya tekhnika dlya uslovij evro-severo-vostoka Rossii: materialy 2-oj Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Kirov: Zonal'nyj nauchno-issledovatel'skij institut sel'skogo hozjajstva Severo-Vostoka imeni N.V. Rudnickogo [Machine technology and new agricultural equipment for the conditions of the Euro-North-East of Russia: Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference. Kirov: N.V. Rudnitsky Zonal Research Institute of Agriculture of the North-East]. 2000, pp. 130–137 (in Russ.).
 3. Alatyrev S.S., Savelichev K.A., Alatyreva I.S., Grigor'ev A.O. New technologies and technical means for harvesting cabbage. Traktory i sel'skohozyajstvennye mashiny. 2008. No 7, pp. 16–17 (in Russ.).
 4. Alatyrev S.S., YUrkin A.P., Kruchinkina I.S., Alatyrev A.S. Production check of a new method of mechanized harvesting of cabbage. Traktory i sel'hoz mashiny. 2017. No 12, pp. 3–7 (in Russ.).
 5. Alatyrev S.S., Mishin P.V., Alatyrev A.S. New cabbage harvester. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2018. No 1, pp. 102–107 (in Russ.).
 6. Alatyrev S.S., Alatyrev A.S., YUrkin A.P. Assessment of the economic efficiency of the new method of harvesting cabbages. Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Sovremennoe sostoyanie prikladnoj nauki v oblasti mekhaniki i ehnergetiki», provodimoy v ramkah meropriyatij, posvyashchennyh 85-letiyu CHuvashskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii, 150-letiyu Russkogo tekhnicheskogo obshchestva i priurochennoj k 70-letiyu so dnya rozhdeniya doktora tekhnicheskikh nauk, professora, zasluhenno-go rabotnika vysshej shkoly Rossijskoj Federacii Akimova Aleksandra Petrovicha [Materials of the All-Russian scientific-practical conference «The current state of applied science in the field of mechanics and energy», carried out in the framework of the events dedicated to the 85th anniversary of the Chuvash State Agricultural Academy, 150th anniversary of the Russian Technical Society and dedicated to the 70th anniversary of the birth of the doctor of technical sciences, Professor, Honored Worker of Higher School of the Russian Federation Akimov Alexander Petrovich]. CHEBOKSARY: FGBOU VO CHuvashskaya GSKHA. 2016, pp. 31–38 (in Russ.).
 7. Alatyrev S.S., Kruchinkina I.S., Alatyrev A.S. Analytical substantiation of the design parameters of the device for careful shipment of heads in the cabbage machine harvesting. Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii. 2017. No 8, pp. 29–34 (in Russ.).

8. Alatyrev S.S., YUrkin A.P., Voronin V.V., Kruchinkina I.S., Alatyrev A.S. Sposob uborki kochannoj kapusty i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya [The method of harvesting cabbage and device for its implementation]: patent na izobrenenie No 2554403, Rossijskaya Federaciya. Opublikovano 27.06.2015. Byul. No 3.
9. Alatyrev S.S., Mishin P.V., Kruchinkina I.S., Alatyrev A.S. Optimization of the process of shipping and packing kohans into containers during machine harvesting of cabbage in a sparing mode. Vestnik KrasGAU. 2018. No 1, pp. 101–108 (in Russ.).
10. Ventcel' E.S. Issledovanie operacij [Operations research]. Moscow: «Sovetskoe radio» Publ. 1972. 552 p.

ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВОВ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО ПАРКА И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА БАЗЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГОСРЕДСТВ ДЛЯ ОСНОВНЫХ РЕГИОНОВ ЮГА РОССИИ

SUBSTANTIATION OF MACHINE AND TRACTOR FLEET COMPOSITIONS AND THEIR EFFICIENCY ON THE BASIS OF UNIVERSAL MOBILE POWER FACILITIES FOR THE MAIN REGIONS OF THE SOUTH OF RUSSIA

А.И. БУРЬЯНОВ, д.т.н.

Ю.О. ГОРЯЧЕВ, к.т.н.

И.В. ЧЕРВЯКОВ

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Аграрный научный центр «Донской» подразделение СКНИИМЭСХ, (ФГБНУ АНЦ «Донской»), г. Зерноград, Ростовская обл., Россия, burjanov2015@yandex.ru

A.I. BUR'YANOV, DSc in Engineering

YU.O. GORYACHEV, PhD in Engineering

I.V. CHERVYAKOV

Federal state budgetary scientific institution of the Agricultural research centre «Donskoy» unit North Caucasus institute of agricultural mechanization and electrification, Zernograd, Rostov region, Russia, burjanov2015@yandex.ru

Техническое оснащение агропромышленного производства РФ имеет неуклонную тенденцию к ухудшению своего состояния вследствие старения техники как в физическом, так и в моральном отношении. Это в самом скором времени может напрямую угрожать продовольственной безопасности страны. Положение может быть нормализовано на основе широкого применения решений, базирующихся на максимальной универсализации с.-х. техники, в первую очередь мобильных энергетических средств, и способности выполнения агрегатами на их базе широкого списка работ – от почвообработки до уборки. Такие разработки ведутся как ведущими зарубежными фирмами, так и на территории РФ, в частности в ФГБНУ АНЦ «Донской», подразделение СКНИИМЭСХ (ранее ВНИПТИ-МЭСХ), совместно с ОАО «Гомсельмаш» (республика Беларусь). В данной работе приведены результаты оценки целесообразности применения универсальных энергосредств со специальными технологическими адаптерами в южной зоне Ростовской области, центральной зоне Краснодарского края и зерново-скотоводческой зоне Ставропольского края. Каждая зона представлена в виде хозяйств, с типовым для нее севооборотом и тремя размерами площади пашни 1250, 2500, 5000 га. Выполнение механизированных работ осуществляется с применением серийной техники (базовый вариант) и сочетанием серийной техники и включением в состав альтернатив универсального энергетического средства с комплектом технологических адаптеров для уборки зерновых культур, кукурузы на силос и трав на сенаж (предлагаемый). В результате рассчитаны составы МТП и показатели эффективности модельных хозяйств. Выполнение механизированных работ осуществляется с применением серийной техники (базовый вариант) и серийной техники в сочетании с универсальным энергетическим средством, снабженным комплектом технологических адаптеров для уборки зерновых культур, кукурузы на силос и трав на сенаж (предлагаемый вариант). Снижение прямых эксплуатационных затрат составляет до 22 % в сравнении с МТП на базе серийной техники, удешевление парка машин – до 29 %, рост чистого дисконтированного дохода – до 26 %.

Ключевые слова: машинно-тракторный парк, энергетическое средство, универсальность, модельное хозяйство, типовой севооборот, оптимизация.

Technical equipment of agro-industrial production of the Russian Federation has a steady tendency to deterioration of its condition due to aging technology both physically and morally. This may very soon directly threaten the country's food security. The situation can be normalized on the basis of a wide application of solutions based on the maximum universalization of the village. equipment, primarily mobile power facilities, and the ability of units to carry out a wide list of works on their basis – from tillage to harvesting. Such developments are carried out both by leading foreign firms and in the territory of the Russian Federation, in particular, at the FSUE ANC «Donskoy», a unit of North Caucasus institute of agricultural mechanization and electrification (formerly VNIPTIMESH) together with OJSC «Gomselmash» (Belarus). This paper presents the results of assessing the feasibility of using universal power tools with special technological adapters in the southern zone of the Rostov region; Each zone is represented as farms, with crop rotations typical for it and with three arable land sizes of 1250, 2500, 5000 hectares. The implementation of mechanized work is carried out using serial equipment (basic version) and a combination of serial equipment and the inclusion in the composition of alternatives of universal energy means, with a set of technological adapters for harvesting grain crops, corn for silage and grass for haylage. As a result, the composition of the machine and tractor fleet and performance indicators of model farms were calculated. The improvement of the main indicators of efficiency in the application of a universal energy tool with a set of technological adapters is observed in all the models under consideration. The reduction in direct operating costs is up to 22 % in comparison with machine and tractor fleet based on serial equipment, the reduction in the cost of the car park is up to 29 %, the growth of net discounted income is up to 26 %.

Keywords: machine and tractor fleet, energy tool, versatility, model farming, model crop rotation, optimization.

Введение

Начиная с 1990-х гг., наблюдается неуклонная тенденция к ухудшению состояния технического оснащения отечественного АПК. Тракторный и комбайновый парки сокращаются вследствие катастрофического старения техники и разрушения отечественного с.-х. машиностроения.

На этом фоне наращивается интервенция в сельхозмашиностроении со стороны ведущих зарубежных фирм – как импорт «под ключ», так и сборка на территории РФ. Это в самом скором времени может напрямую угрожать продовольственной безопасности страны.

Энергооснащенность аграрного комплекса России (на 1 га обрабатываемой площади) по сравнению с ведущими западными странами ниже в 3–7 раз [1].

Такое положение приводит к увеличению сроков выполнения механизированных, в том числе и уборочных, работ в 1,5–2 и более раз., по сравнению с агротехнически обоснованными. Увеличение продолжительности выполнения уборочных работ на 15–20 дней против нормативных 9–10 приводит к снижению валового сбора на 30–40 %, что крайне негативно влияет на экономическое положение хозяйствующих субъектов.

Решением проблемы может стать универсализация энергетических средств и создание для агрегатирования с ними специальных уборочных адаптеров различного назначения. Такие исследования ведутся в течение достаточно продолжительного времени [2, 3].

Это предполагает возможность выполнения максимально широкого спектра механизированных работ одним и тем же типом техники.

Одним из таких перспективных направлений в последнее время является создание универсального энергетического средства (условное наименование – УЭС), компоновочная схема и конструктивно-технологические параметры которого непрерывно совершенствуются на протяжении ряда лет [4, 5, 6, 7].

Однако при этом требуется принятие обоснованных решений на всех этапах жизненного цикла средств механизации и их комплексов для условий их возможного применения.

Цель исследования

Состоит в определении эффективности МТП модельных хозяйств основных товаропроизводящих зон юга РФ, имеющих различ-

ные площади землепользования, при применении в их составе УЭС с мощностью двигателя 184 кВт, снабженного специальными технологическими адаптерами для уборки зерновых культур и трав на сенаж и силос.

Материалы и методы

Определение составов и показателей эффективности осуществлялась посредством расчета оптимальных МТП для заданных параметров объектов наложения (модельных хозяйств):

- на базе серийной техники;
- с привлечением в качестве альтернативы универсального энергосредства.

В качестве объектов наложения приняты типовые севообороты, имеющие наибольшую площадь и обеспечивающие основной выход товарной продукции растениеводства. К таковым относятся:

- южная зона Ростовской области;
- центральная зона Краснодарского края;
- зерново-скотоводческая зона Ставропольского края.

Для всех трех моделей расчеты проводились на следующих типоразмерах площади пашни: 1250, 2500 и 5000 га, т.е. от отделения сельхозпредприятия до хозяйства средних размеров.

Использованы следующие схемы типовых севооборотов согласно Системам ведения АПК и рекомендациям зональных НИИ:

- южная зона Ростовской области: 1. Пар черный. 2. Озимая пшеница. 3. Озимая пшеница. 4. Кукуруза на силос. 5. Озимая пшеница. 6. Зернобобовые. 7. Озимая пшеница. 8. Кукуруза на зерно. 9. Яровой ячмень. 10. Подсолнечник [8];

- Краснодарский край, центральная зона: 1. Кукуруза на зерно. 2. Озимая пшеница. 3. Сахарная свекла. 4. Озимая пшеница. 5. Озимый ячмень. 6. Подсолнечник. 7. Озимая пшеница. 8. Кукуруза на силос. 9. Озимая пшеница. 10. Зернобобовые и подсолнечник. 11. Озимая пшеница. 12. Многолетние травы (выводное поле) [9];

- Ставропольский край зерново-скотоводческая зона: 1. Зернобобовые. 2. Озимая пшеница. 3. Озимая пшеница. 4. Подсолнечник. 5. Кукуруза на силос. 6. Озимая пшеница. 7. Озимая пшеница. 8. Кукуруза на зерно [10].

В качестве альтернатив мобильной энергетике задействованы средства механизации различных тяговых классов, серийно выпуска-

емые заводами сельхозмашиностроения РФ и ближнего зарубежья, а также проектируемое универсальное энергетическое средство (условное наименование – УЭС-У).

В результирующих таблицах не представлена стационарная и специализированная техника (как-то свеклоуборочные комбайны и т.п.).

Цены на производимую продукцию, ТСМ, семена, удобрения, химикаты, а также средства механизации соответствуют уровню, сложившемуся на конец 2017 г.

Определение потребности в средствах механизации и показателей эффективности комплексов машин осуществлялось путем расчета оптимальных составов машинно-тракторного парка для каждой из рассматриваемых моделей, как это предполагает ГОСТ [11]. В качестве инструментария использована автоматизированная система проектирования технологий и технического оснащения растениеводства, разработанная во ВНИПТИМЭСХ (ныне – ФГБНУ АНЦ «Донской», подразделение СКНИИМЭСХ). Система позволяет осуществлять расчет оптимального машинно-тракторного парка для различных производственных условий хозяйствующих субъектов. Определение состава МТП основано на применении модели частично-целочисленного линейного программирования, адаптированного к особенностям решаемой задачи [12, 13].

Общая схема получения необходимой расчетной информации представлена на рис. 1. Процесс включает 2 вложенных цикла: объемлющий – по моделям и внутренний – по типоразмерам. На каждом шаге алгоритма осуществляется расчет оптимального МТП для заданных условий (структура посевных площадей, размер землепользования) в двух вариантах: а) только с серийной техникой и б) с включением УЭС в альтернативы. Таким образом, рассчитывается 18 вариантов.

Результаты исследования и обсуждение

Наиболее существенными факторами, влияющими на состав технического оснащения хозяйства, являются:

- зональное размещение, определяющее структуру севооборотов и сроки проведения работ;
- размеры землепользования.



Рис. 1. Укрупненная структурная схема последовательности проведения вычислительной процедуры при определении эффективности МТП модельных хозяйств

Варьируемость этих факторов исследовалась в настоящих расчетах.

В табл. 1 и 2 приведены результаты расчетов МТП для вышеперечисленных моделей при различных размерах их площади пашни.

Из приведенных в таблицах данных видно, что во всех вариантах включаемые в состав МТП универсальные энергосредства заменяют зерноуборочные комбайны Acros и силосоуборочные Дон-680, а также снижают потребность в тракторах Агромаш-90ТГ, заменяя их на энергоемких работах. Влияние УЭС на наличие универсально-пропашных тракторов отсутствует, что объясняется невозможностью их использования при выполнении уходных работ за пропашными культурами. Из этого следует, что при снижении в структуре посевных площадей доли пропашных культур и культур, сроки возделывания и уборки которых не совпадают, уровень годовой загрузки универсальных энергосредств будет возрастать.

Таблица 1

Состав парка мобильной энергетики для модельных хозяйств юга России, сформированный на базе серийной техники (база) и с включением универсального энергетического средства (УЭС)

Наименование мобильных энергосредств и их количество в базовом варианте и с включением универсального энергосредства (УЭС)												
Модели	Агромаш-90ТГ		Беларус-1221		Беларус-952		Acros		Дон-680		УЭС	
	база	УЭС	база	УЭС	база	УЭС	база	УЭС	база	УЭС	база	УЭС
Ростовская область, юг												
1250 га	1	1	2	1	1	1	2		1			2
2500 га	2	1	2	2	2	2	4		1			4
5000 га	5	2	2	3	4	4	8		2			8
Краснодарский край, центр												
1250 га	2	1	2		2	2	3		1			3
2500 га	5	1	3		4	4	6		1			6
5000 га	9	1	4	1	9	9	13		2			13
Ставропольский край, з.с. зона												
1250 га	2	1	3		2	2	2		1			2
2500 га	3	1	5	1	3	3	4		1			4
5000 га	6	2	10	2	6	6	8		2			8

Таблица 2

Годовая загрузка машин для уборки зерновых

Модели	Acros	УЭС-У
Ростовская область		
1250 га	124	354
2500 га	123	438
5000 га	123	414
Краснодарский край		
1250 га	121	313
2500 га	120	383
5000 га	110	336
Ставропольский край		
1250 га	134	364
2500 га	133	470
5000 га	133	473

Во всех трех моделях при увеличении площади пашни в два раза, практически во столько же раз увеличивается потребность в УЭС в предлагаемых вариантах. Наиболее наглядно снижение количественного состава мобильной энергетики при внедрении УЭС имеет место в модельном хозяйстве центральной зоны Краснодарского края площадью пашни 5000 га. Здесь в базовом варианте 37 единиц средств мобильной энергетики, а в предлагаемом 24 единицы, что весьма существенно влияет на потребность хозяйства в механизаторах. Интенсивность использования универсально-

го энергосредства в этой модели может быть увеличена при его применении в качестве уборочной машины на уборке свеклы, так как этот вариант нами не рассматривался из-за отсутствия прогнозируемых параметров по свеклоуборочному адаптеру.

Следует отметить, что тракторы общего назначения тяговых классов 40 кН и выше в процессе оптимизации МТП не выбраны по причине непропорционально высокого соотношения цена/производительность, а также недостаточной номенклатуры агрегируемых орудий, способных обеспечить полную реализацию их потенциала.

Гусеничные тракторы класса 30 кН (Агромаш-90ТГ и подобные, в основном выпускаемые ВГТЗ) присутствуют в МТП всех модельных хозяйств из-за нецелесообразности применения колесной техники в ранневесенний период (обычно 7–8 дней с начала полевых работ), а также необходимости выполнения работ по трамбовке зеленой массы гусеничными машинами при ее закладке на сенаж и силос. В остальные рабочие периоды данный трактор задействован на пахоте, сплошной культивации, лущении стерни и других, имея преимущества по показателю – цена/производительность.

Потребность в основной мобильной энергетике изменяется во всех моделях практиче-

ски линейно с увеличением площади пашни. Непропорциональное изменение количества высвобождаемых тракторов при увеличении площади землепользования есть следствие перераспределения выполняемых объемов работ между альтернативными агрегатами.

Кроме того, имеет место округление при решении задачи целочисленного линейного программирования. Например, потребность в зерноуборочных комбайнах в пиковый период составляет 12,4 шт. Дробное количество машин, очевидно, является абсурдом. Округление до 12,0 означает невыполнение объемов работ, что недопустимо. Точнее, при этом выбираются альтернативные машины, а при их отсутствии (единственный агрегат, способный выполнять данную операцию) производится округление вверх (в данном случае – до 13).

Определяющими потребность в универсально-пропашных тракторах (класс 14 кН) являются периоды междурядной обработки пропашных культур, а также уборка сена (модельное хозяйство центральной зоны Краснодарского края), внесение удобрений, посев озимых, боронование и другие работы малой энергоемкости.

Тракторы общего назначения класса 20 кН и выше имеют пиковую потребность, определяющую их максимальное количество, в период осенней глубокой обработки почвы (вспашка на 25–27 см). В различных модельных хозяйствах площади, требующие такой обработки, составляют до 50 % общего размера землепользования (пропашные, яровые, черный пар). Соответственно, в прочие периоды полевого сезона такие тракторы задействуются на других, в основном более легких, работах. Это относится и к лушению стерни (6–8 см) после уборки зерновых колосовых, а данный период не является, вообще говоря, пиковым для тракторов общего назначения. В случае же применения УЭС, последнее имеет ярко выраженный пик на уборке колосовых, полностью заменяя традиционные зерноуборочные комбайны. В остальные периоды УЭС максимально задействуется на прочих работах, в первую очередь на осенней вспашке. Будучи полноценным эквивалентом трактора класса 40 кН, УЭС высвобождает значительное количество менее мощных тракторов, в связи с чем пиковая потребность в них смещается на период уборки колосовых – лушение и последующую вспашку.

Комбайны типа Асгос полностью заменяются на УЭС, которое в агрегате со специализированным адаптером обеспечивает такую же производительность, но при этом в прочие периоды полевого сезона не простаивает, а выполняет другие механизированные работы.

Кормоуборочные комбайны в базовом варианте используются на уборке кукурузы на силос и также полностью заменяются на УЭС со специализированным модулем-адаптером. Многолетние же травы присутствуют только в модельном хозяйстве центральной зоны Краснодарского края, их уборка осуществляется агрегатами на базе универсально-пропашных тракторов с соответствующим шлейфом. Это обусловлено тем, что уборка трав в этой зоне осуществляется в полевые периоды, не являющиеся пиковыми.

При введении в парк УЭС улучшается годовая загрузка техники. В качестве примера в табл. 2 представлена загрузка серийных комбайнов и многофункционального энергетического средства

Как видно из таблицы, интенсивность использования техники в случае применения УЭС существенно возрастает, что позитивно сказывается на уровне показателей эффективности. Это же относится к тракторам общего назначения: сокращение количественного состава имеет следствием повышение годовой загрузки с тем же результатом.

Показатели эффективности МТА, сформированных для выполнения механизированных работ в модельных хозяйствах юга России, при сравнимых вариантах их комплектации техникой приведены в табл. 3.

Из представленных данных видно, что все показатели эффективности при внедрении в состав МТП УЭС улучшаются. УЭС частично заменяет тракторы общего назначения и полностью – зерноуборочные комбайны типа Асгос пропускной способностью 9–10 кг/с, а также силосоуборочную технику. В результате такой замены снижаются все виды затрат, что приводит к росту чистого дисконтированного дохода. При включении УЭС в состав МТП прямые эксплуатационные затраты снижаются:

- в модельном хозяйстве южной зоны Ростовской области на 13–17 %,
- в модельном хозяйстве центральной зоны Краснодарского края на 3–8 %,,
- в модельном хозяйстве зерново-скотоводческой зоны Ставропольского края на 16–22 %.

Показатели эффективности МТП модельных хозяйств юга России

Модели	Эксплуатационные затраты, тыс. руб.		Стоимость МТП, тыс. руб.		Расход топлива, т		Затраты труда, чел.-ч		Чистый дисконтированный доход, млн руб.	
	база	УЭС	база	УЭС	база	УЭС	база	УЭС	база	УЭС
Ростовская область										
1250 га	10899	9413	56555	49214	55	52	3974	3299	77	89
2500 га	19258	15967	93375	76815	106	105	7957	6199	175	199
5000 га	35879	29720	171780	133568	233	232	17204	12950	363	419
Краснодарский край										
1250 га	13348	12962	79686	70879	74	71	5874	4977	90	101
2500 га	23418	21421	112919	107373	150	144	11300	9845	225	235
5000 га	45705	41819	215501	207037	300	292	23200	19799	462	481
Ставропольский край										
1250 га	11691	9794	59583	47980	63	59	4483	3792	70	85
2500 га	21637	16856	106325	75578	123	120	8812	6971	151	190
5000 га	41817	32459	199695	141164	249	242	17869	14059	312	395

Стоимость парка машин (необходимого размера капитальных вложений) для модельного хозяйства юга Ростовской области снижается на 13–22 %, для модели центральной зоны Краснодарского края – на 4–11 %, для модели зерново-скотоводческой зоны Ставропольского края – на 19–29 %. Чистый дисконтированный доход за весь срок эксплуатации предлагаемого МТП увеличивается: по регионам, соответственно, на 13–15, 4–12 и 21–26 %.

В качестве примера на рис. 2 представлены графики зависимости удельной величины прямых эксплуатационных затрат на выпол-

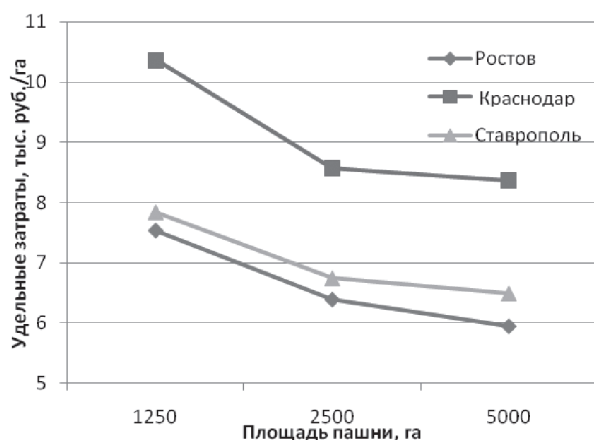


Рис. 2. Зависимость удельных эксплуатационных затрат от площади пашни модельных хозяйств зон юга России

нение всего объема механизированных работ в полеводстве для рассматриваемых моделей в расчете на 1 га обрабатываемой площади (варианты с использованием УЭС).

Как видно из графика, по всем моделям наблюдается устойчивое снижение уровня удельных затрат.

Затраты по модельному хозяйству центральной зоны Краснодарского края заметно выше, чем для прочих, что связано с более высокими урожайностями и широким спектром выполняемых операций (в частности, работ по возделыванию и уборке сахарной свеклы).

Различия в составах МТП и значениях показателей их эффективности обусловлены:

- особенностями зональных почвенно-климатических условий;
- вытекающей из этого специфики производственной структуры и севооборотов;
- различием в урожайностях возделываемых культур.

Незначительное снижение расхода ТСМ (единицы процентов) объясняется высокой мощностью двигателя УЭС (184 кВт), что избыточно для большинства работ малой энергоемкости. По той же причине остается неизменным количество универсально-пропашных тракторов (класс 1,4 – 66 кН). Решить эту проблему можно, например, путем установки двигателя с переменной мощностью.

Выраженным пиком потребности в механизаторах по всем рассматриваемым моделям, типоразмерам и вариантам комплектации МТП является период уборки зерновых колосовых, в котором, помимо обмолота и транспортировки урожая, выполняется (согласно технологическим картам) также и послеуборочная обработка почвы. В случае использования только традиционной техники уборка осуществляется серийными комбайнами (Acros), а обработка почвы – тракторами общего назначения. В случае же введения в парк УЭС последнее задействуется как на обмолоте хлебов, так и на обработке почвы, а также на уборке силосных культур.

Выводы

При использовании УЭС в типовых севооборотах юга России улучшение показателей эффективности, в зависимости от структуры посевных площадей и размеров землепользования, прямые эксплуатационные затраты снижаются:

- в модельном хозяйстве южной зоны Ростовской области на 13–17 %;
- в модельном хозяйстве центральной зоны Краснодарского края на 3–8 %;
- в модельном хозяйстве зерново-скотоводческой зоны Ставропольского края на 16–22 %.

Стоимость парка машин (необходимого размера капитальных вложений) для модельного хозяйства юга Ростовской области снижается на 13–22 %, для модели центральной зоны Краснодарского края – на 4–11 %, для модели зерново-скотоводческой зоны Ставропольского края – на 19–29 %. Чистый дисконтированный доход за весь срок эксплуатации предлагаемого МТП увеличивается: по регионам, соответственно, на 13–15, 4–12 и 21–26 %.

Расчеты показывают экономическую целесообразность применения УЭС во всех рассматриваемых моделях.

Литература

1. Ночевкина Е.В., Горяинова Л.В. Техническая оснащенность сельского хозяйства России // Научное сообщество студентов XXI столетия. Экономические науки: сб. ст. по мат. XXXVIII междунар. студ. науч.-практ. конф. № 1 (38). URL: [http://sibac.info/archive/economy/1\(38\).pdf](http://sibac.info/archive/economy/1(38).pdf) (дата обращения: 13.03.2018).
2. Рунчев М.С., Краснопольский А.Н., Перерва А.П. Основы универсализации и комбинирова-

ния машин в полеводстве. Ростов-на-Дону: Ростовский университет, 1969. 183 с.

3. Евтенко В.Г. Технологические основы универсализации сельскохозяйственных тракторов и самоходных комбайнов // Техника в сельском хозяйстве. 1995. № 1. С. 16–19.
4. Бурьянов А.И., Дмитренко А.И. Современные тенденции развития мобильных энергетических средств // Техника и оборудование для села. 2015. № 6. С. 8–14.
5. Бурьянов А.И., Дмитренко А.И., Горячев Ю.О. Об эффективности универсальных мобильных энергетических средств // Научная жизнь. 2015. № 6. С. 43–50.
6. Бурьянов А.И., Дмитренко А.И., Пахомов В.И., Камко А.И., Рехлицкий О.В., Волков И.В. Сельскохозяйственный зерноуборочный агрегат модульного построения: патент на изобретение № 2642092, Российская Федерация. Опубликовано 24.01.2018. Бюл. № 3.
7. Бурьянов А.И., Дмитренко А.И., Пахомов В.И., Камко А.И., Рехлицкий О.В., Волков И.В. Сельскохозяйственный зерноуборочный агрегат модульного построения: патент на изобретение № 2643710, Российская Федерация. Опубликовано 05.02.2018. Бюл. № 4.
8. Система ведения агропромышленного производства Ростовской области (на период 2001–2005 гг.). Ростов-на-Дону: Феникс, 2001. 927 с.
9. Система ведения агропромышленного производства Краснодарского края на 1991–1995 гг. Краснодар, 1990. 283 с.
10. Системы земледелия Ставропольского края. Ставропольское книжное издательство, 1983. 272 с.
11. ГОСТ Р 53056-2008. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки. М.: Изд-во стандартов, 2009. 23 с.
12. Бурьянов М.А., Горячев Ю.О. Совершенствование математической модели оптимизации состава МТП сельхозпредприятия // Техника будущего: перспективы развития сельскохозяйственной техники: Сб. статей междунар. науч.-практ. конференции. Краснодар, 2013. С. 105–108.
13. Горячев Ю.О. Обоснование состава и границ эффективности технического оснащения растениеводства // автореф. дис. ... канд. техн. наук. Зерноград. 1999. 20 с.

References

1. Nochyovkina E.V., Goryainova L.V. Technical equipment of agriculture in Russia. Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletiya. ENkonomich-

- eskie nauki: sb. st. po mat. XXXVIII mezhdunar. stud. nauch.-prakt. konf. [Scientific community of students of the XXI century. Economic Sciences: a collection of articles on materials XXXVIII Intern. stud scientific-practical conf.]. No 1(38). URL:[http://sibac.info/archive/economy/1\(38\).pdf](http://sibac.info/archive/economy/1(38).pdf) (data obrashcheniya: 13.03.2018) (in Russ.).
2. Runchev M.S., Krasnopol'skij A.N., Pererva A.P. Osnovy universalizacii i kombinirovaniya mashin v polevodstve [Basics of universalization and combination of machines in the field]. Rostov-na-Donu: Rostovskij universitet Publ., 1969. 183 p.
 3. Evtenko V.G. Technological basis for the universalization of agricultural tractors and self-propelled combines. Tekhnika v sel'skom hozyajstve. 1995. No 1, pp. 16–19 (in Russ.).
 4. Bur'yanov A.I., Dmitrenko A.I. Current trends in the development of mobile energy facilities. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2015. No 6, pp. 8–14 (in Russ.).
 5. Bur'yanov A.I., Dmitrenko A.I., Goryachev YU.O. The effectiveness of universal mobile energy facilities. Nauchnaya zhizn'. 2015. No 6, pp. 43–50 (in Russ.).
 6. Bur'yanov A.I., Dmitrenko A.I., Pahomov V.I., Kamko A.I., Rekhlickij O.V., Volkov I.V. Sel'sko-hozyajstvennyj zernouborochnyj agregat modul'nogo postroeniya [Agricultural grain harvesting unit of modular construction]: patent na izobretenie No 2642092, Rossijskaya Federaciya. Opublikovano 24.01.2018. Byul. No 3.
 7. Bur'yanov A.I., Dmitrenko A.I., Pahomov V.I., Kamko A.I., Rekhlickij O.V., Volkov I.V. Sel'sko-hozyajstvennyj zernouborochnyj agregat modul'nogo postroeniya [Agricultural grain harvesting unit of modular construction]: patent na izobretenie No 2643710, Rossijskaya Federaciya. Opublikovano 05.02.2018. Byul. No 4.
 8. Sistema vedeniya agropromyshlennogo proizvodstva Rostovskoj oblasti (na period 2001–2005 gg.) [The system of agricultural production in the Rostov region (for the period 2001–2005)]. Rostov-na-Donu. Feniks. 2001. 927 p.
 9. Sistema vedeniya agropromyshlennogo proizvodstva Krasnodarskogo kraja na 1991–1995 gg. [The system of agricultural production of the Krasnodar region in 1991–1995.]. Krasnodar, 1990. 283 p.
 10. Sistemy zemledeliya Stavropol'skogo kraja [The systems of agriculture of the Stavropol Krai]. Stavropol'skoe knizhnoe izdatel'stvo Publ., 1983. 272 p.
 11. GOST R 53056-2008. Agricultural machinery. Methods of economic evaluation. Moscow: Izd-vo standartov Publ., 2009. 23 p.
 12. Bur'yanov M.A., Goryachev YU.O. Improving the mathematical model of optimization of the composition of the machine-tractor fleet of agricultural enterprises. Tekhnika budushchego: perspektivy razvitiya sel'skohozyajstvennoj tekhniki: Sb. statej mezhdunar. nauch.-prakt. konferencii [Technique of the future: prospects for the development of agricultural machinery: Collection of articles of the Intern. scientific-practical conference]. Krasnodar, 2013, pp. 105–108 (in Russ.).
 13. Goryachev YU.O. Obosnovanie sostava i granic ehffektivnosti tekhnicheskogo osnashcheniya rastenievodstva: avtoref. dis... kand. tekhn. nauk [Justification of the composition and limits of the effectiveness of technical equipment of crop production: author. dis. ... cand. tech. of science]. Zernograd. 1999. 20 p.