



# ТРАКТОРЫ И СЕЛЬХОЗМАШИНЫ

---

## НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

---

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

**Каминский В.Н.**

Издаётся с февраля 1930 г.

**1•2019**

ОТВЕТСТВЕННЫЙ РЕДАКТОР

**Лепёшкин А.В.**

Выходит 6 раз в год

ISSN 0321-4443

DOI: 10.31992/0321-4443-2019-1

### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Годжаев З.А.**

**Городецкий К.И.**

**Ерохин М.Н.**

**Жалнин Э.В.**

**Измайлов А.Ю.**

**Ковалёв М.М.**

**Котиев Г.О.**

**Ксеневич 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 ОБОРУДОВАНИЕ**Болоев П.А., Друзьянова В.П., Петров Н.В.**Экспериментальный стенд для исследования  
энергетической установки с биогазовым ДВС

## НОВЫЕ МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

**Сибирев А.В., Аксенов А.Г.**Результаты экспериментальных исследований  
подкапывающего лемеха для уборки лука**Кем А.А.**Сеялка с сошниками для посева зерновых  
и разноуровневого внесения минеральных удобрений**Ревенко В.Ю.**Обоснование параметров агрегата для совмещения операций  
посева и внесения полимерного гидрогеля в почву

## ТЕОРИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЯ

**Кутьев Г.М.**

Развитие технической концепции трактора

**Чупин П.В., Союнов А.С., Головин А.Ю.,  
Кирасиров О.М., Демчук Е.В.**Равновесие ромбовидного плуга  
в горизонтальной плоскости**Шило И.Н., Романюк Н.Н., Орда А.Н., Кушнир В.Г.**Влияние числа осей колесных транспортно-тяговых машин  
на сопротивление качению**Поддубный В.И., Ненайденко А.С., Байбасаров Р.Р.**Дорожные испытания электромеханической системы  
управления движением колесного трактора**Сиротин П.В., Жилейкин М.М.**Исследование динамики движения зерно- и кормоуборочных  
комбайнов методами математического и имитационного  
моделирования**Демидов Н.Н., Добрецов Р.Ю., Медведев М.С.**Фрикционные механизмы поворота в двухпоточных  
трансмиссиях транспортных гусеничных машин

## КАЧЕСТВО, НАДЕЖНОСТЬ

**Сергеев Н.В., Сенькевич С.Е.**Определение коэффициентов сопротивления  
боковому уводу шин для достижения требуемых  
эксплуатационных качеств МТАЭКОНОМИКА, ОРГАНИЗАЦИЯ  
И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА**Припоров И.Е.**Системные исследования приготовления  
белковых комбицормов**Пахомов В.И., Газалов В.С., Буханцов К.Н.**Регрессионная математическая модель двухэтапной  
комбинированной электротехнологии высокотемпературной  
конвективной сушки и озоновоздушной обработки зернаENVIRONMENTALLY CLEAN TECHNOLOGIES  
AND EQUIPMENT**Болоев П.А., Друзьинова В.П., Петров Н.В.**Experimental test bench for the study of a power plant  
with a biogas internal combustion engine

3

## NEW MACHINES AND EQUIPMENT

**Sibiriov A.V., Aksenov A.G.**The results of experimental studies of digging plow  
for onions

9

**Kem A.A.**Seeder with openers for sowing grain  
and multi-level application of mineral fertilizers

16

**Revenko V.Y.**Justification of the parameters of the unit  
for combining the sowing operations and  
the introduction of polymer hydrogel in the soil

21

## THEORY, DESIGN, TESTING

**Kut'kov G.M.**

The development of the technical concept of the tractor

27

**Chupin P.V., Soyunov A.S., Golovin A.YU.,  
Kirasirov O.M., Demchuk E.V.**The balance of the diamond-shaped plow  
in the horizontal plane

36

**SHilo I.N., Romanyuk N.N., Orda A.N., Kushnir V.G.**The influence of the number of axles of wheeled transport  
traction machines on rolling resistance

41

**Poddubny V.I., Nenaidenko A.S., Baybasarov R.R.**Road tests of an electromechanical wheel tractor motion  
control systemctor

47

**Sirotin P.V., Zhilejkin M.M.**Research of dynamics of movement of grain  
and forage harvesters by methods of mathematical  
and imitating modeling

53

**Demidov N.N., Dobretsov R.Yu., Medvedev M.S.**Frictional steering devices in two-flow transmissions  
of transport caterpillar vehicles

60

## QUALITY, RELIABILITY

**Sergeev N.V., Sen'kevich S.E.**Determination of lateral tire drag coefficients  
to achieve the required performance characteristics  
of machine-tractor unit

70

ECONOMICS, ORGANIZATION  
AND TECHNOLOGY OF MANUFACTURING**Priporov I.E.**

System studies of the preparation of protein feed

75

**Pahomov V.I., Gazalov V.S., Buhancov K.N.**Regression mathematical model of two-stage combined  
electrical technology of high-temperature convective  
drying and ozone-air grain processing

81

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, gladkikh@viniti.ru;  
 «Урал-Пресс», тел. (495) 789-86-36, e\_tymoshenkova@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.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С БИОГАЗОВЫМ ДВС

## EXPERIMENTAL TEST BENCH FOR THE STUDY OF A POWER PLANT WITH A BIOGAS INTERNAL COMBUSTION ENGINE

П.А. БОЛОЕВ<sup>1</sup>, д.т.н.

В.П. ДРУЗЬЯНОВА<sup>2</sup>, д.т.н.

Н.В. ПЕТРОВ<sup>2</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup> Бурятский государственный университет, Улан-Удэ, Россия,

<sup>2</sup> Северо-Восточный федеральный университет

им. М.К. Амосова, Якутск, Россия, petnikvad1988@mail.ru

Р.А. BOLOEV<sup>1</sup>, DSc in Engineering

V.P. DRUZYANOVA<sup>2</sup>, DSc in Engineering

N.V. PETROV<sup>2</sup>, PhD in Engineering

<sup>1</sup> Buryat State University, Ulan-Ude, Russia

<sup>2</sup> M.K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia, petnikvad1988@mail.ru

Биогаз является альтернативным источником энергии, в настоящее время его также можно использовать в качестве моторного топлива для бензиновых двигателей внутреннего сгорания с искровым зажиганием. В данной статье рассмотрен биогаз, полученный путем переработки навоза КРС. Полученный биогаз был обогащен и компримирован до уровня природного газа. Данная принципиальная схема экспериментального стенда для исследования автомобильного биогазового ДВС. Приведено описание измерительных приборов, используемых на данном экспериментальном стенде. В данной работе поставлена задача создания автоматизированного стенда для исследования рабочего процесса двигателя, который приспособлен для работы на биогазе. Для выбора и обоснования параметров рабочего процесса необходим полный комплекс измерительной аппаратуры, удовлетворяющий следующим требованиям: возможность работы на бензине и биогазе; возможность управления составом рабочей смеси, как при работе на бензине, так и на биогазе; возможность принудительного управления величиной угла опережения зажигания; измерение момента сопротивления на валу двигателя во всем диапазоне изменения частоты вращения ( $n = 800...5590 \text{ мин}^{-1}$ ); регистрация давления в цилиндре двигателя (индикаторная диаграмма) с последующим определением индикаторных показателей; регистрация расхода воздуха и топлива; поддержание стабильного температурного режима двигателя. Кроме того, автоматизированная система исследования должна обеспечивать сбор экспериментальных данных для оперативной обработки и набора базы данных. Применение биогаза в качестве топлива для бензиновых двигателей внутреннего сгорания позволит сохранить природные ресурсы и улучшить экологическое и экономическое состояние как Республики Саха (Якутия), так и России в целом.

**Ключевые слова:** биогаз, экспериментальный стан, датчик, измерительный прибор.

Biogas is an alternative source of energy, now it can also be used as a motor fuel for gasoline engines of internal combustion with spark ignition. This article describes the biogas obtained by processing cattle manure. The obtained biogas was enriched and compressed to the level of natural gas. A schematic diagram of the experimental test bench for the study of automotive biogas engine is given. A description of the measuring instruments used in this experimental test bench is shown. In this paper, the task is to create an automated test bench for the study of the workflow of the engine, which works on biogas. To select and justify the parameters of the workflow, a full range of instrumentation is needed, which satisfies the following requirements: the ability to work on gasoline and biogas; the ability to control the composition of the working mixture, both when working on gasoline and biogas; the possibility of forced control of the value of ignition advance angle; measurement of the moment of resistance on the motor shaft in the whole range of rotational speed variation ( $n = 800...5590 \text{ min}^{-1}$ ); registration of pressure in the engine cylinder (indicator diagram) with the subsequent determination of indicator characteristics; registration of air and fuel consumption; maintaining a stable temperature mode of the engine. In addition, an automated research system should provide for the collection of experimental data for on-line processing and for the collection of a database. The use of biogas as a fuel for gasoline internal combustion engines will save natural resources and improve the ecological and economic status of the Republic of Sakha (Yakutia) and whole Russia.

**Keywords:** biogas, experimental test bench, sensor, measuring device.

## Введение

Важным этапом при создании биогазового двигателя является его экспериментальное исследование. На этом этапе проверяется адекватность математических моделей, применяемых для расчетного исследования различных процессов в двигателе, а также основные расчетные результаты, полученные с их помощью.

Кроме того, с использованием экспериментального стенда выполняется доводка рабочего процесса биогазового ДВС.

## Цель исследования

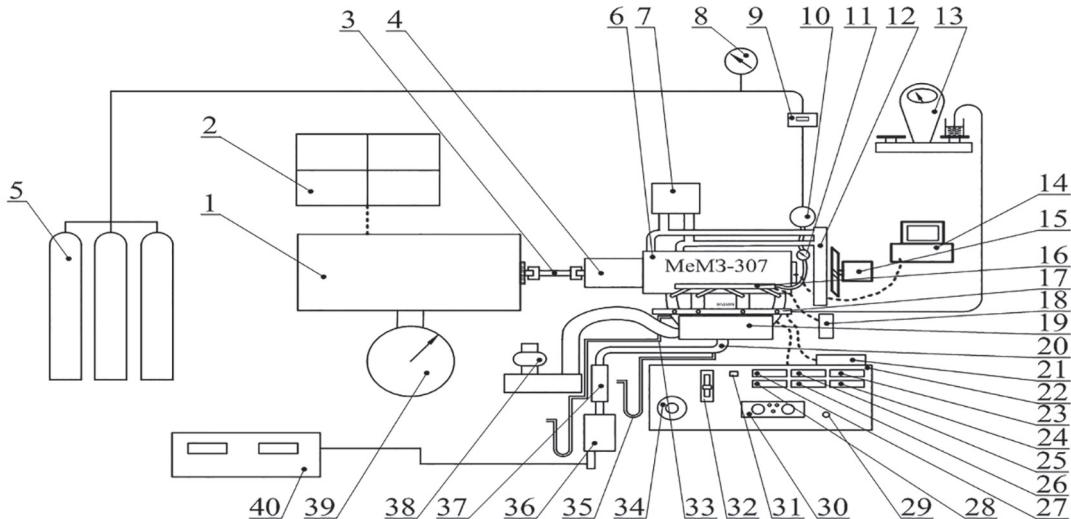
Создание экспериментального стенда на базе автомобильного биогазового ДВС. Достижение этой цели является наиболее ответственным этапом в его исследовании и в этой связи актуальной задачей.

## Методы и средства проведения исследования

В настоящее время накоплен значительный опыт создания специальных стендов для довод-

ки газовых двигателей [1–3]. Такие стены оборудованы классическими системами топливоподачи и зажигания, которые дают возможность ручного управления параметрами. Микропроцессорные системы управления, которыми оснащены современные двигатели, не позволяют изменять коэффициент избытка воздуха и угол опережения зажигания (УОЗ) в ручном режиме. Поэтому поставлена задача дополнительно разработать ряд устройств, которые позволят изменять количество топлива и УОЗ в широком диапазоне, не изменения характеристических карт микропроцессорной системы управления.

В качестве базы для создания биогазового ДВС был выбран серийно выпускаемый в настоящее время заводом АвтоЗАЗ-Мотор ЗАО «ЗАЗ» и устанавливаемый на автомобили ZAZ Sens двигатель MeMZ-307 (основное топливо – бензин АИ-95). В серийном исполнении этот двигатель имеет следующие конструктивные и эксплуатационные характеристики: диаметр цилиндра 75 мм; ход поршня 73,5 мм; степень сжатия 9,8; эффективная мощность 51,5 кВт



**Рис. 1. Структурная схема экспериментального стенда на базе автомобильного биогазового ДВС:**

- 1 – балансирная машина;
- 2 – набор сопротивлений;
- 3 – карданская передача;
- 4 – коробка передач;
- 5 – баллоны с биогазом;
- 6 – двигатель MeMZ-307;
- 7 – водяной теплообменник;
- 8 – манометр;
- 9 – расходомер газа;
- 10 – двухступенчатый газовый редуктор;
- 11 – манометр;
- 12 – радиатор двигателя;
- 13 – весы для измерения расхода жидкого топлива;
- 14 – измерительно-вычислительный комплекс;
- 15 – вентилятор;
- 16 – газовая рампа с форсунками;
- 17 – бензиновая рампа с форсунками;
- 18 – ЭБУ газовой системы;
- 19 – впускной коллектор;
- 20 – выпускной коллектор;
- 21 – ЭБУ двигателя;
- 22 – пульт управления;
- 23 – прибор для измерения температуры охлаждающей жидкости;
- 24 – прибор для измерения температуры масла;
- 25 – прибор для измерения температуры ОГ;
- 26 – прибор для измерения давления масла в системе смазки;
- 27 – прибор для измерения частоты вращения коленчатого вала;
- 28 – прибор для измерения частоты вращения коленчатого вала;
- 29 – замок зажигания;
- 30 – панель приборов автомобиля;
- 31 – переключатель вида топлива;
- 32 – рукоятка для управления дроссельной заслонкой;
- 33 – устройство для изменения сопротивления впускной системы;
- 34 – устройство для управления нагрузкой на ДВС;
- 35 – прибор для измерения сопротивления выпускной системы;
- 36 – глушитель шума;
- 37 – резонатор;
- 38 – расходомер воздуха;
- 39 – весовое устройство для измерения нагрузки;
- 40 – газоанализатор

при частоте вращения коленчатого вала  $n = 5200 \text{ мин}^{-1}$ . Микропроцессорная система управления двигателем – «Микас 10.3».

При переводе данного двигателя на биогаз степень сжатия была увеличена до  $\epsilon = 13,5$ .

Структурная схема стенда приведена на рис. 1.

Для возможности плавного изменения момента сопротивления на валу двигателя, при проведении испытаний стенд оборудован электрическим нагрузочным устройством МПБ-100 1 (рис. 1). Для передачи мощности от двигателя к балансирной машине используется механическая коробка передач ВАЗ 2103, которая позволяет работать в широком диапазоне частот вращения коленчатого вала двигателя, а также карданной передачи. Стенд оборудован дополнительным воздушным вентилятором 15, а также дополнительным теплообменником 7, при помощи которых можно моделировать температурный режим, максимально приближенный к реальным условиям эксплуатации. С той же целью на стенде установлен глушитель шума и резонатор от штатной системы выпуска отработавших газов автомобиля ZAZ Sens. Для изменения сопротивления выпускной системы предусмотрена заслонка 33.

Для исследования работы двигателя на альтернативных газообразных видах топлива стенд оборудован газовой системой 4-го поколения, которая включает в себя: каскад баллонов с запасом газа 5, двухступенчатый газовый редуктор 10, магистраль высокого и низкого давления, газовую рампу с форсунками 16, блок управления газовой системой 18. Для выбора вида топлива на панели пульта управления 22 предусмотрен переключатель 31.

Исследования в области эргономики рабочего места оператора [5] показывают, что наибольшую информативность для человека несет визуальное наблюдение за низкочастотным процессом, поэтому в качестве регистрирующих приборов используются демпфированные стрелочные измерители (8, 11, 13, 30, 39), а также светоизлучающие цифровые индикаторы (23–28).

Основной задачей системы автоматического сбора данных (САСД) является обеспечение исследования набором данных, характеризующих ход протекания эксперимента. Для экспериментов различного рода необходимо охватить достаточно много параметров. А построение многоканальной измерительной системы для сигналов различного рода является

трудоемкой и дорогостоящей работой. Поэтому, используя опыт, полученный при построении автоматизированной системы исследования двигателей [4], для построения САСД было решено использовать альтернативные функции электронного блока управления (ЭБУ).

На двигателе МeМЗ-307 установлен ЭБУ «Микас-10.3», который, кроме основной функции управления, имеет встроенные функции мониторинга и диагностики. Используя ПК со специальным программным обеспечением (ПО) и устройство связи (K-line адаптер) (рис. 2), производится опрос ЭБУ с целью получения текущие значения сигналов датчиков и управляющих воздействий. Кроме того, ПО позволяет использовать и функцию диагностики для быстрого поиска и устранения неисправностей.

Система управления впрыском газа использует ЭБУ «OMVL», который также имеет функцию мониторинга и подключается к ПК посредством специального OMVL адаптера.

САСД позволяет получать следующие параметры:

- частота вращения коленчатого вала двигателя ( $\text{мин}^{-1}$ );
- положение дроссельной заслонки (%);
- угол опережения зажигания (град. п.к.в.);
- длительность импульса впрыска топлива (мс);
- массовый расход воздуха ( $\text{кг}/\text{ч}$ );
- давление во впускном коллекторе ( $\text{мм р. ст.}$ );
- температура охлаждающей жидкости ( $^{\circ}\text{C}$ );
- температура воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ );
- расчетный часовой расход топлива ( $\text{л}/\text{ч}$ );
- расчетный путевой расход топлива ( $\text{л}/100 \text{ км}$ );
- скорость автомобиля ( $\text{км}/\text{ч}$ );
- напряжение бортовой сети (В);
- фактическое положение шагового мотора РХХ (шаг);
- напряжение на датчике кислорода (В);
- время накопления импульса зажигания (мс);
- температура газа в редукторе ( $^{\circ}\text{C}$ );
- температура газа в рампе ( $^{\circ}\text{C}$ );
- давление газа в рампе (Па);
- время открытия газовой форсунки (мс).

Частота опроса ЭБУ составляет 5 Гц, что, в связи с инерционностью двигателя, вполне достаточно для записи перечисленных параметров не только для статических, но и для переходных режимов.

Задачей измерительного комплекса является регистрация быстропротекающих процессов ДВС. В диагностических целях для этого в основном используют осциллограф, но для исследования ДВС, в особенности на переходных режимах, требуются наборы статистических данных подряд записанных циклов. Кроме того, количество требуемых параметров зачастую превышает количество каналов осциллографов общего применения.

Одним из таких параметров является кривая изменения давления в цилиндре (индикаторная диаграмма), которая дает наглядное представление о протекании параметров состояния рабочего тела в течение цикла. Для обработки индикаторная диаграмма должна сопровождаться различными метками синхронизации, такими как верхняя мертвая точка (ВМТ), нижняя мертвая точка (НМТ), момент зажигания (МЗ) и т.п. Поэтому для разработки измерительного комплекса было решено использовать многоканальное устройство ввода, вывода и обработки аналоговой и цифровой информации в персональных компьютерах на базе платы L-783 (ЗАО «Л-Кард»).

Технические характеристики платы L-783:

- интерфейс связи PCI;
- 16 дифференциальных каналов или 32 канала с общей землей для аналогового ввода;
- максимальная частота работы 12-битного АЦП – 2857(3300) кГц;
- два входа для внешней синхронизации при вводе сигнала;
- порт цифрового ввода/вывода, имеющий 16 входных и 16 выходных линий;
- диапазоны входного сигнала  $\pm 5$  В,  $\pm 2,5$  В,  $\pm 1,25$  В,  $\pm 0,625$  В.

Структурная схема измерительного комплекса представлена на рис. 2.

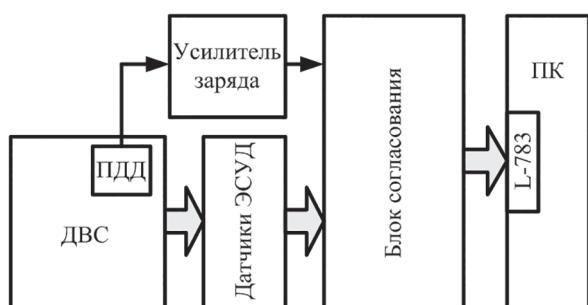


Рис. 2. Структурная схема измерительно-вычислительного комплекса

Здесь сигналы штатных датчиков ЭСУД и пьезоэлектрического датчика давления (ПДД) через усилитель заряда поступают на блок согласования, в котором происходит преобразование и нормирование сигналов по уровню во избежание превышения предельно-допустимых значений по входу устройства ввода-вывода. Далее посредством АЦП сигналы оцифровываются и поступают в компьютер. В качестве программного обеспечения ПК используется программа Power Graph, которая имеет расширенные функции предварительной настройки. Это позволяет настроить канал измерения давления на отображения сигнала в МПа для адекватного восприятия получаемых данных во время эксперимента.

Для установки датчика давления в первом цилиндре головки цилиндров был выполнен специальный канал. Обеспечение стабильного температурного режима датчика достигалось принудительным водяным охлаждением.

Для работы ДВС на обедненных смесях, а также для доводки параметров рабочего процесса двигателя при работе на газовом топливе необходимо обеспечить возможность принудительного управления количеством топлива в составе топливовоздушной смеси и углом опережения зажигания. Для этого на стенде задействована система управления двигателем, приведенная на рис. 3.

Применение ЭБУ не дает возможности управлять бензовоздушной смесью в ручном режиме, а изменение программы блока, во-первых, приводит к нарушению заводских настроек, во-вторых, не позволяет изменять коэффициент избытка воздуха динамически, непосредственно во время эксперимента. Поэтому было разработано устройство, в задачи которого входят: измерение текущего времени впрыска, динамическое изменение времени впрыска на заданную величину, отображение информации о текущих параметрах. Устройство включено в разрыв цепи управления клапанами форсунок и обеспечивает дискретное изменение текущего времени впрыска в пределах  $\pm 20\%$ .

Для нормального функционирования устройства управления топливоподачей необходимо использовать имитатор датчика кислорода, чтобы исключить коррекцию электронного блока по сигналу обратной связи с датчика кислорода. Имитатор отключает датчик и на вход ЭБУ подает сигнал о том, что коэффициент избытка воздуха находится в пределах 1.

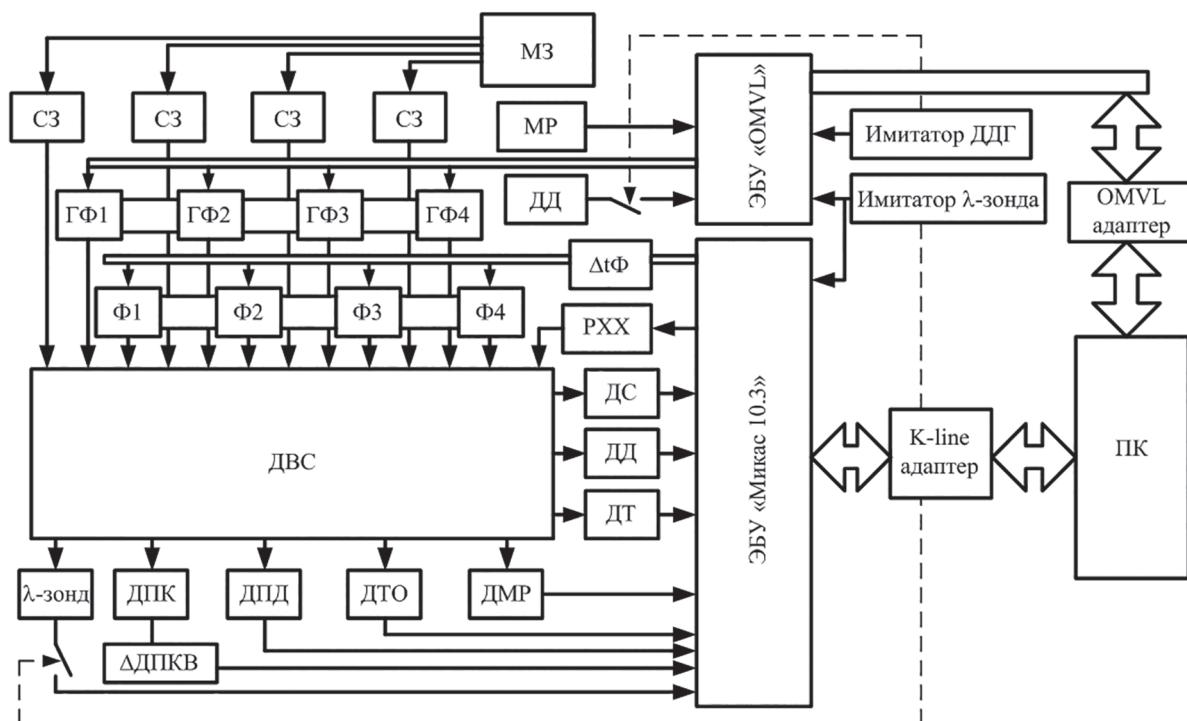


Рис. 3. Система управления биогазовым ДВС на стенде

Контроллер газовой системы OMVL производит коррекцию времени открытия газовых форсунок по сигналу датчика давления в газовой рампе (ДДГ). Принудительное управление газовоздушной смесью обеспечивается на двух уровнях: на первом – установкой необходимого давления в газовой рампе при помощи редуктора; на втором – отключением штатного ДДГ и подачей сигнала с имитатора датчика давления (им. ДДГ) на вход ЭБУ. Такой способ управления охватывает широкий диапазон изменения коэффициента избытка воздуха и позволяет производить оперативные воздействия во время эксперимента.

Синхронизация работы двигателя и ЭСУД производится по сигналу датчика положения коленчатого вала (ДПКВ). Из всех управляющих воздействий электронного блока только момент зажигания имеет жесткую привязку к положению КВ. Используя этот фактор разработан вариатор сигнала ДПКВ ( $\Delta$ ДПКВ), который включается в разрыв цепи датчика и позволяет смещать сигнал ДПКВ на заданный угол.

Для получения топлива для проведения экспериментальных исследований была задействована биогазовая заправка, приведенная на рис. 4.

Биогаз из реактора 1 объемом 0,7 м<sup>3</sup> попадает в барботажную камеру 2, в которой очищается от механических примесей, сероводорода и части углекислого газа. Далее топливо попа-

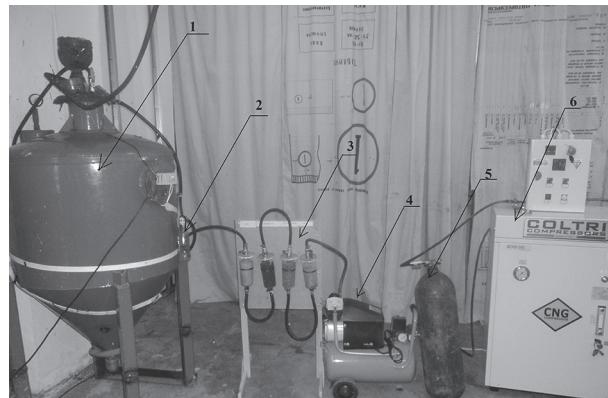


Рис. 4. Технологическая схема

#### автобиогазовой заправки:

- 1 – биогазовый реактор;
- 2 – барботажная камера;
- 3 – сепаратор;
- 4 – компрессор низкого давления КПП-230-24;
- 5 – реассивер;
- 6 – компрессор высокого давления МСН-10

дает в сепаратор, состоящий из четырех последовательно расположенных фильтров со следующими наполнителями: древесная стружка, активированный уголь, металлическая стружка, природный цеолит. Данный сепаратор удаляет из биогаза водяные пары, а также большую часть CO<sub>2</sub>. Меняя толщину фильтрующего слоя в угольном и цеолитовом фильтрах, можно получать биогаз с содержанием CO<sub>2</sub> от 7 до 50 % по объему. Далее биогаз с помощью заправочной установки МСН-10 закачивается в расходные баллоны под давлением до 20 МПа.

## Заключение

В результате проведенных исследований создан исследовательский стенд для автомобильного биогазового ДВС. Стенд оснащен полным комплексом измерительной аппаратуры для определения индикаторных и эффективных показателей двигателя.

Кроме этого разработана автоматизированная система управления двигателем на стенде, позволяющая по команде с поста управления изменять параметры подачи топлива и угол опережения зажигания.

## Литература

1. Банцев В.Н., Левтеров А.М., Мараховский В.П. Газовый двигатель на базе четырехтактного дизеля общего назначения // Техно – plus. Харьков. 2003. № 10. 92 с.
2. Захарчук В.І., Сітовський О.П., Козачук І.С. Розрахунково-експериментальні дослідження газового двигуна, переобладнаного з дизеля // Автомобільний транспорт. Харків: ХНАДУ. 2005. Вип. 16. С. 276–278.
3. Богомолов В.А., Абрамчук Ф.И., Манойло В.М., Кабанов А.Н., Салдаев С.В. Экспериментальная установка для доводки систем зажигания и управления газовым двигателем с искровым зажиганием 6Ч 13/14 // АвтоГазоЖаправочный комплекс + Альтернативное топливо. М.: АГЗК+АТ. 2005. № 4 (22). С. 42–45.
4. Абрамчук Ф.И., Пойда А.Н., Ефремов А.А., Сивых Д.Г., Проскурин А.В. Новая автоматизированная система исследования и диагностированная автотракторных двигателей // Авто-мобильный транспорт. Харьков: ХНАДУ. 2005. Вып. 17. С. 28–34.
5. Мунипов В.М., Зинченко В.П. Эргономика: человекоориентированное проектирование техники, программных средств и среды // Логос. 2001. 356 с.

## References

1. Bgancev V.N., Levterov A.M., Marahovskij V.P. Gas engine based on a four-stroke general purpose engine. Tekhno – plus. Har'kov. 2003. No 10. 92 p. (in Russ.).
2. Zaharchuk V.I., Sitov'skij O.P., Kozachuk I.S. Rozrahunkovo-eksperimental'n'i doslidzhennya gazovogo dviguna, peresobladnanogo z dizelya. Avtomobil'nyj transport. Har'kiv: HNADU Publ. 2005. Vip. 16, pp. 276–278.
3. Bogomolov V.A., Abramchuk F.I., Manojlo V.M., Kabanov A.N., Saldaev S.V. Experimental device for maintaining of ignition systems and control of a gas engine with spark ignition 6H 13/14. Avto-GazoZapravochnyj kompleks + Al'ternativnoe topivo. Moscow: AGZK+AT Publ.. 2005. No 4 (22), pp. 42–45 (in Russ.).
4. Abramchuk F.I., Pojda A.N., Efremov A.A., Sivyh D.G., Proskurin A.V. New automated system for study and di-agnostics of automotive and tractor engines. Avtomobil'nyj transport. Har'kov: HNADU Publ.. 2005. Vyp. 17, pp. 28–34 (in Russ.).
5. Munipov V.M., Zinchenko V.P. EHrgonomika: chelovekoorientirovannoe proektirovanie tekhniki, programmnyh sredstv i sredy [Ergonomics: person-oriented design of equipment, software and environment]. Logos Publ. 2001. 356 p.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОДКАПЫВАЮЩЕГО ЛЕМЕХА ДЛЯ УБОРКИ ЛУКА

## THE RESULTS OF EXPERIMENTAL STUDIES OF DIGGING PLOW FOR ONIONS

А.В. СИБИРЕВ, к.т.н.  
А.Г. АКСЕНОВ, к.т.н.

ФГБНУ «Федеральный научный агротехнический центр ВИМ», Москва, Россия, sibirev2011@yandex.ru

A.V. SIBIRYOV, PhD in Engineering  
A.G. AKSENOV, PhD in Engineering

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia,  
sibirev2011@yandex.ru

Качественная работа лукоуборочных машин, как при двухфазном, так и при однофазном способах уборки, обеспечивается удовлетворительной подготовкой поля перед уборкой. Даже незначительное содержание растительных примесей (свободная ботва, сорняки) 2...4 % (по агротехническим требованиям – до 5 %) делает ворох непригодным ни для реализации, ни для хранения. Качество выполнения технологического процесса работы машины для уборки лука определяется работой выкапывающего рабочего органа, так как от его типа и технологических параметров зависят конструктивно-технологические параметры сепарирующих устройств. Представлена конструкция выкапывающего лемеха для уборки корнеплодов и лука машины для уборки лука. Данная конструкция, за счет предварительной сепарации лука от почвенных комков, соизмеримых по размерам с луковицами, и, как результат, снижения поступления почвенных комков на сепарирующие органы уборочной машины, повышает качественные показатели работы сепарирующих органов. Представлены результаты исследований выкапывающего лемеха для уборки корнеплодов и лука по определению подачи вороха лука на подкапывающий лемех в зависимости от изменения физико-механических свойств почвы и технологических параметров (глубина подкапывания и поступательная скорость движения) исследуемого рабочего органа. Описаны методика и применяемое оборудование при проведении исследований. Результаты исследований представлены в виде графических зависимостей, анализ исследований проведен методом вариационной статистики.

**Ключевые слова:** подкапывающий лемех, луковицы, лук-севок, полнота сепарации.

The high-quality work of the harvesting machines, both in two-phase and single-phase methods of harvesting, is ensured by satisfactory preparation of the field before harvesting. Even an insignificant content of plant matter (free tops, weeds) of 2...4 % (according to agrotechnical requirements – up to 5 %) makes the heap unsuitable neither for sale nor for storage. The quality of the technological process of the operation of the onion harvesting machine is determined by the work of the digging tool body, since, depending on the type and technological parameters of this tool body, the structural and technological parameters of the separating devices depend. The design of the lifting plowshare for harvesting root crops and onions of the onion harvesting machine is presented. The proposed lifting plowshare for harvesting root crops and onions due to pre-separation of onions from soil lumps, commensurate in size with the bulbs, improves the quality performance of the harvesting bodies, resulting in a decrease in the flow of soil lumps to the harvesting bodies. The results of studies of the lifting plowshare for harvesting root crops and onions to determine the supply of a pile of onions to the lifting plowshare depending on changes in the physical and mechanical properties of the soil and technological parameters (depth of digging and translational speed of movement) of the working body under investigated working body are shown. The technique and the equipment used for research were explained. The results of the research are presented in the form of graphical dependencies; the analysis of the research was carried out by the method of variation statistics.

**Keywords:** lifting plowshare, onions, onion sets, separation completeness.

## Введение

Основным сдерживающим фактором большого распространения промышленного производства лука-севка является отсутствие средств механизированной уборки луковиц, отвечающих агротехническим требованиям, а именно полноте сепарации вороха луковиц лука-севка от почвенных примесей. Кроме того, в связи с увеличением урожайности лука-севка, в результате использования в качестве семенного материала высокоурожайных гибридов (Геркулес F1, Стурон, Трой F1, Штур БС 20, Центурион F1, Форум F1, Глобус, Золотничок), происходит увеличения массы и количества его луковиц на одном погонном метре [1, 2, 3].

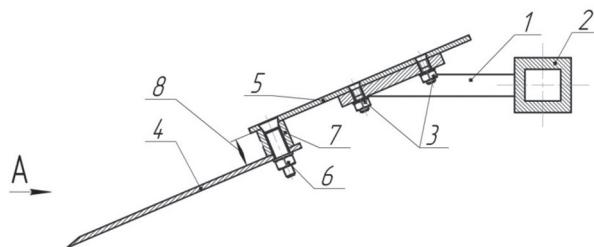
Следовательно, увеличивается подача вороха лука-севка с поверхности подкапывающих на сепарирующие рабочие органы современных лукоуборочных машин, которые не обеспечивают полноту выделения почвенных примесей при уборке лука-севка в современных условиях его производства [4].

## Цель исследований

Определение величины подачи вороха лука-севка с выкапывающего органа для уборки мелкосидящих корнеплодов и лука на сепарирующие рабочие органы машин для уборки корнеплодов и лука.

## Материалы и методы

Для снижения повышенного поступления почвенных примесей на сепарирующие рабочие органы уборочных машин предлагается конструкция выкапывающего органа для уборки мелкосидящих корнеплодов и лука [5] (рис. 1).



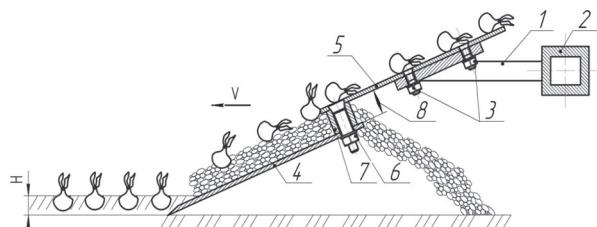
**Рис. 1. Конструктивно-технологическая схема выкапывающего лемеха для уборки корнеплодов и лука:**

1 – кронштейн; 2 – рама; 3 – соединение болтовое; 4 – секция подкапывающая; 5 – секция транспортирующая; 6 – болтовое соединение; 7 – проставка; 8 – технологический зазор

Выкапывающий лемех для уборки корнеплодов и лука, установленный на кронштейне 1, который закреплен на раме 2 болтовым соединением 3, состоит из подкапывающей 4 и транспортирующей 5 секций.

Секции 4 и 5 соединены между собой болтовым соединением 6 с проставками 7, образуя технологический зазор 8, величина которого регулируется в зависимости от глубины  $H$  погружения лемеха в почву.

Устройство работает следующим образом (рис. 2).



**Рис. 2. Схема работы выкапывающего лемеха для уборки корнеплодов и лука:**

1 – кронштейн; 2 – рама; 3 – соединение болтовое; 4 – секция подкапывающая; 5 – секция транспортирующая; 6 – болтовое соединение; 7 – проставка; 8 – технологический зазор

При поступательном движении уборочной машины в направлении  $V$  заглушенный на небольшую глубину  $H$  выкапывающий лемех для уборки лука подрезает пласт, состоящий из земли и луковиц.

В связи с тем, что луковицы размещены выше относительно поверхности почвы, при подрезании почвенного пласта они будут перемещаться по поверхности подкапывающей секции 4 лемеха выше, чем почвенный пласт.

При достижении почвенным пластом крайнего обреза подкапывающей секции 4 лемеха, последний сходит на поверхность поля через технологический зазор 8, образованный между подкапывающей 4 и транспортирующей 5 секциями выкапывающего лемеха для уборки лука, которые соединены между собой болтовым соединением 5 с проставками 6.

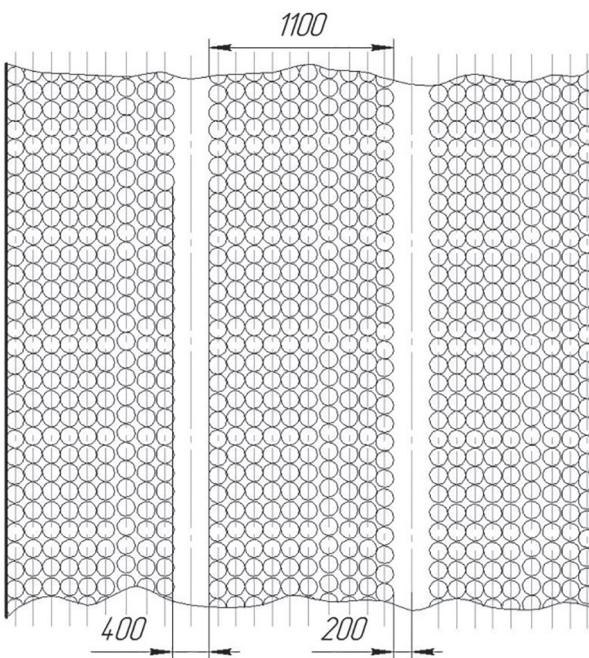
Луковицы, отделенные от почвенных комков, направляются на транспортирующую секцию 5 лемеха и дальнейшую очистку на сепарирующих рабочих органах уборочной машины.

Для исследования величины подачи вороха лука-севка с поверхности подкапывающего лемеха для уборки мелкосидящих корнеплодов и лука на сепарирующие рабочие органы

лукоуборочных машин нами были проведены исследования в условиях Пензенской области в 2016–2017 гг.

Семена лука сорта Штутгартер Ризен высевали на опытном участке (Предшественником семян лука была капуста; кислотность почв pH 5,6–6,7. Семена лука высевались по строчно-полосной схеме посева (шестистрочная 45 + 25 см), при которой стыковые междуурядья и междуурядья для колес трактора равны 50 см, а остальные – 40 см [6, 7, 8].

Выбор данной схемы посева семян лука для возделывания лука-севка обусловлен возможностью использования машин на уходе и уборке с колеей трактора 140 см (рис. 3). В период вегетации проводились фенологические наблюдения и биометрические измерения.



**Рис. 3. Схема посева семян лука сорта Штутгартер Ризен при проведении исследований по определению величины подачи вороха лука-севка на подкапывающий лемех для уборки корнеплодов и лука**

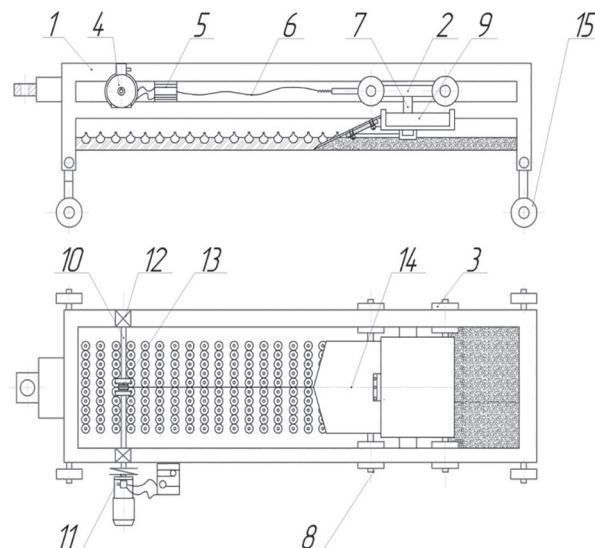
С целью определения величины подачи  $Q_{\text{вп}}$  вороха лука-севка на подкапывающий лемех лукоуборочной машины была изготовлена лабораторная установка (рис. 4), которая представляет собой передвижной почвенный канал. Установка позволяетпроводить исследования качественных показателей работы подкапывающих рабочих органов на различных по физико-механическому составу почвах [4].

Установка представляет собой сварную конструкцию, состоящую из направляющих 1, по которым передвигается приводная тележка 2, установленная на четыре колеса 3 и приводимая в движение электродвигателем 4 с частотным преобразователем 5 через гибкую канатную связь 6. Подкапывающий лемех 14 и лоток 9 сбора вороха крепится к крепежной стойке 7, которая монтируется на приводную тележку 2.

Перемещение приводной тележки 2 по направляющим 1 происходит на стальных роликах 3 диаметром 0,15 м посредством электрического привода, состоящего из асинхронного электродвигателя 4 и частотного преобразователя 5, позволяющего регулировать не только частоту вращения вала электродвигателя, но и направление вращения вала.

Методика определения величины подачи  $Q_{\text{вп}}$  вороха лука-севка с поверхности подкапывающего лемеха на сепарирующие рабочие органы заключается в следующем.

Для обеспечения требуемой влажности почвы, необходимой для проведения исследований, ее увлажняли посредством поверхностного полива, далее выдерживали несколько



**Рис. 4. Схема лабораторной установки по определению подачи вороха лука-севка на выкапывающий лемех для уборки корнеплодов и лука:**

- 1 – направляющие;
- 2 – тележка приводная;
- 3 – ролик стальной;
- 4 – электродвигатель;
- 5 – преобразователь частотный;
- 6 – связь канатная;
- 7 – стойка крепежная;
- 8 – ось тележки;
- 9 – лоток сбора вороха;
- 10 – вал привода тележки;
- 11 – муфта предохранительная;
- 12 – подшипник;
- 13 – катушка с ребордами ограничительными;
- 14 – подкапывающий лемех;
- 15 – опорные колеса

часов для достижения необходимой влажности в почвенном горизонте, соответствующей глубине подкапывания луковиц.

Опыты проводили при условии, что влажность почвы соответствовала требуемому значению, в соответствии с планом эксперимента.

Передвижной почвенный канал устанавливался на опытную делянку посевов лука-севка (рис. 5). Подкапывающий лемех 7 (стандартная ширина захвата 1,2 м) устанавливается на приводную тележку 2 передвижного почвенного канала на глубину подкапывания в диапазоне от 0,02...0,05 м, с интервалом варьирования в 0,01 м посредством перемещения крепежной стойки 7 по приводной тележке 2. Лоток 9 сбора вороха лука-севка соединялся жестко с подкапывающим лемехом. Затем приводили в движение тележку 2, поступательная скорость движения которой изменялась с шагом 0,2 м/с от минимального значения, равного 0,4 м/с до предельного значения 1,8 м/с [6]. После прохождения приводной тележкой 2 опытной де-

лянки производился забор луко-почвенного вороха из лотка 9 с последующим взвешиванием на электронных весах модели МК-15.2-А21.

Величину подачи вороха лука-севка на подкапывающий лемех 7 при установленных ранее технологических параметрах определяли по формуле:

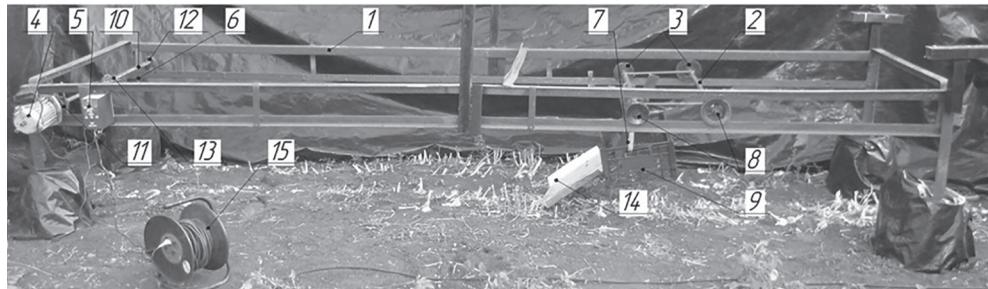
$$Q_{\text{вп}} = \frac{m \cdot V_{\text{л}}}{L}, \quad (1)$$

где  $m$  – масса луко-почвенного вороха в лотке, кг;  $V_{\text{л}}$  – поступательная скорость движения приводной тележки, м/с;  $L$  – длина подкапывающего лемеха, м.

Рабочую скорость движения тележки определяли по длине учетной делянки (4 м) с учетом времени ее прохождения:

$$V_{\text{л}} = \frac{S_{\text{тел}}}{t_{\text{тел}}}, \quad (2)$$

где  $S_{\text{тел}}$  – путь, пройденный тележкой, м;  $t_{\text{тел}}$  – время прохождения пути, с.



**Рис. 5. Общий вид лабораторной установки по определению подачи вороха лука-севка на выкапывающий лемех для уборки корнеплодов и лука:**

1 – направляющая; 2 – тележка приводная; 3 – ролик стальной; 4 – электродвигатель; 5 – преобразователь частотный; 6 – связь канатная; 7 – стойка крепежная; 8 – ось тележки; 9 – лоток сбора вороха; 10 – вал привода тележки; 11 – муфта предохранительная; 12 – подшипник; 13 – катушка с ребордами ограничительными; 14 – подкапывающий лемех; 15 – фильтр сетевой

*Таблица*

**Результаты исследований по определению величины подачи вороха лука-севка с выкапывающим лемехом для уборки корнеплодов и лука на сепарирующий элеватор**

$V_{\text{л}}$ , м/с	Влажность почвы $W = 18 \%$				Влажность почвы $W = 20 \%$				Влажность почвы $W = 22 \%$			
	Глубина погружения в почву подкапывающей секции , м											
	0,02	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,05
0,4	12,2	15,1	18,2	22,2	13,8	16,3	20,2	23,5	14,4	17,1	21,1	24,2
0,6	14,9	17,7	21,9	25,7	15,7	18,4	22,7	26,4	16,3	18,1	23,4	27,2
0,8	15,3	20,5	25	27,8	16,8	21,4	25,9	28,4	17,2	22,2	26,4	29,3
1,0	16,2	22,4	28,1	30,9	18,3	23,2	29,3	31,6	18,1	24,1	30,1	32,4
1,2	18,5	25,5	31,8	35,5	19,7	26,7	32,3	36,7	20,3	27,3	33,7	37,8
1,4	19,7	27,6	35,7	36,5	21,2	28,4	36,8	38,3	22,4	29,1	37,4	39,1
1,6	23,1	31,7	36,2	41,7	23,9	32,3	38,5	42,6	24,6	33,2	38,8	43,4
1,8	25,7	36,9	36,8	42,4	26,5	36,2	39,3	43,8	28,3	37,3	40,1	44,5

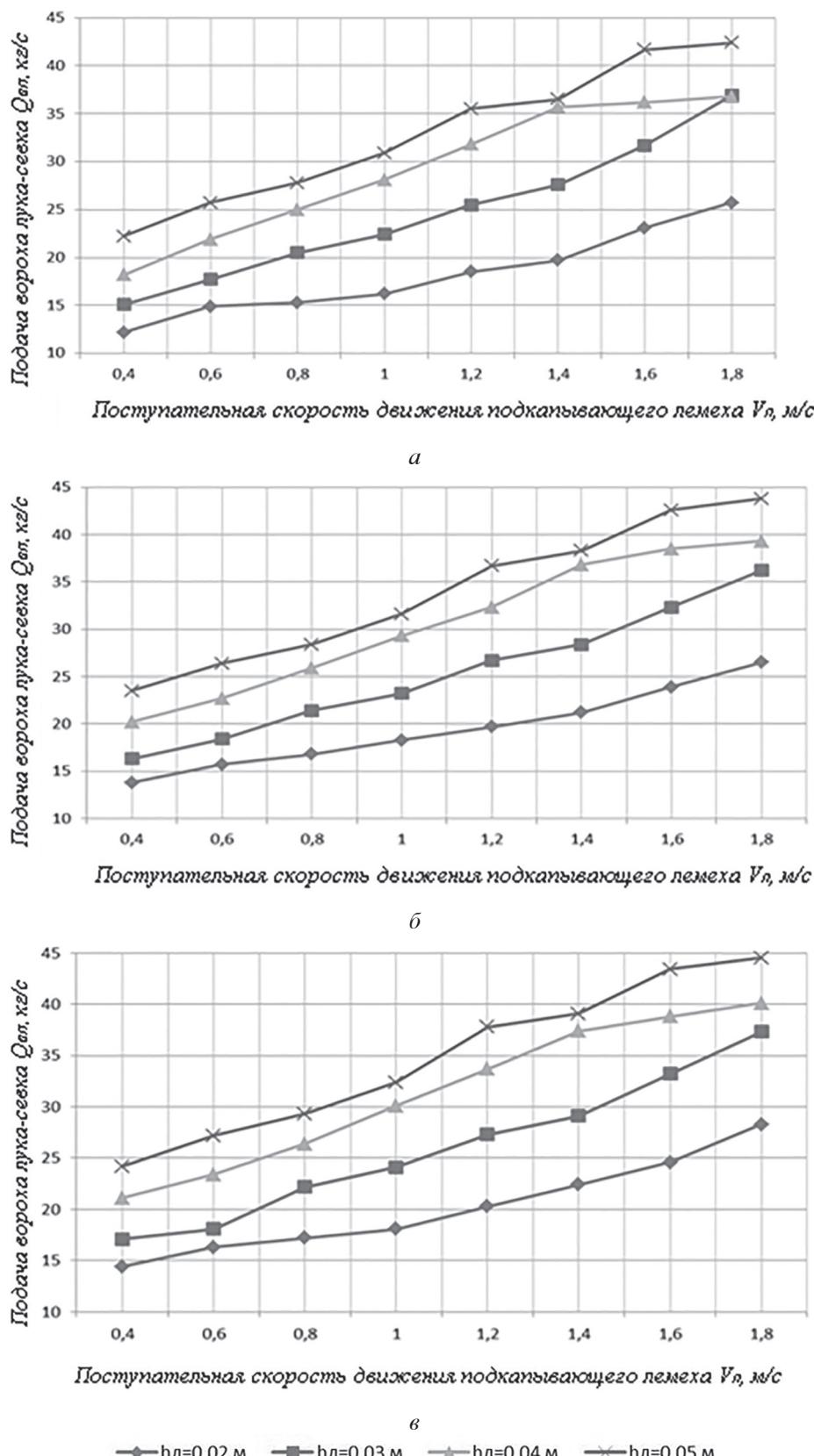


Рис. 6. Зависимость подачи вороха лука-севка от поступательной скорости движения выкапывающего лемеха для уборки корнеплодов и лука и глубины подкапывания луковиц при влажности подкапываемого слоя почвы:  
*a)*  $W = 18 \%$ ; *б)*  $W = 20 \%$ ; *в)*  $W = 22 \%$

С подкапывающих рабочих органов масса почвы с луковицами поступает непосредственно на сепарирующие рабочие органы, на которых происходит отсеивание почвы и растительных примесей.

## Результаты и обсуждение

Результаты исследований по определению подачи вороха лука с поверхности лемеха для уборки корнеплодов и лука обработаны на персональной ЭВМ и представлены в таблице и в виде графиков на рис. 6, которые свидетельствуют о том, что на подкапывающий орган поступает, в зависимости от типа почвы, от 12 до 44 кг массы луко-почвенного вороха при влажности почвы от 18 до 22 %, скорости движения 0,4–1,8 м/с и глубине хода подкапывающего лемеха от 0,02–0,05 м.

По оси абсцисс указан изменяемый технологический параметр – поступательная скорость движения подкапывающей секции при варьировании глубины подкапывания от 0,02 до 0,05 м, по оси ординат – секундная подача вороха лука-севка.

## Выводы

Разработанная лабораторная установка по определению оптимальных технологических параметров выкапывающего лемеха для уборки корнеплодов и лука позволила определить его оптимальные технологические параметры, обеспечивающие повышение качественных показателей сепарации лука-севка в результате предварительной сепарации на рабочей поверхности лемеха, что подтверждает дальнейшую перспективность теоретических и экспериментальных исследований разработанного устройства.

Полученные результаты исследований позволяют определить подачу вороха лука на устройства первичной очистки луковиц с целью обоснования оптимальных режимно-технологических параметров устройств первичной и вторичной сепарации лука.

## Литература

- Аксенов А.Г., Сибирев А.В. Исследование размерно-массовых характеристик лука-севка гибрида «Геркулес F1» // Вестник Казанского ГАУ. 2016. № 2 (40). С. 5–10.
- Емельянов П.А., Сибирев А.В., Аксенов А.Г. Экспериментальные лабораторные исследования цилиндрического очистителя почвенных при-

месей в технологическом процессе сепарации // Вестник Ульяновской ГСХА. 2017. № 2 (24). С. 33–36.

- Лобачевский Я.П., Емельянов П.А., Сибирев А.В., Аксенов А.Г. Машина технология производства лука: монография. М.: ФГБНУ ФНАЦ ВИМ. 2016. 168 с.
- Сибирев А.В. Теоретическое определение величины подачи вороха лука-севка на подкапывающий лемех / Аграрный научный журнал. 2017. № 5. С. 75–78.
- Патент № 2625179 Россия, МПК A01 D33/00. Выкапывающий лемех для уборки мелкосидящих корнеплодов и лука / А.В. Сибирев, А.Г. Аксенов, П.А. Емельянов, С.В. Семичев, М.А. Мсяков. № 2016139484; Заяв. 10.10.2016; Опубл. 12.07.2017, Бюл. № 20.
- Емельянов П.А. Совершенствование технологии и технических средств ориентированной посадки луковиц: дис. ... докт. техн. наук. Пенза, 2002. 305 с.
- Протасов А.А. Совершенствование технологических процессов и технических средств для уборки лука: дис. ... докт. техн. наук. Саратов, 2005. 355 с.
- Ларюшин А.М. Энергосберегающие технологии и технические средства для уборки лука: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01. Пенза, 2010. 426 с.

## References

- A.G. Aksenov, A.V. Sibirev. The study of the size-mass characteristics of the onion set hybrid «Hercules F1». Vestnik Kazanskogo GAU. 2016. No 2 (40), pp. 5–10 (in Russ.).
- P.A. Emelyanov, A.V. Sibiryov, A.G. Aksenov. Experimental laboratory studies of a cylindrical cleaner of soil impurities in the process of separation. Vestnik Ul'yanovskoj GSKHA. 2017. No 2 (24), pp. 33–36 (in Russ.).
- Y.A.P. Lobachevskij, P.A. Emelyanov, A.G. Aksenov, A.V. Sibiryov. Mashinnaya tekhnologiya proizvodstva luka [Machine onion production technology]. Moscow: FGBNU FNAC VIM Publ.. 2016. 168 p.
- A.V. Sibiryov Theoretical determination of the value of the filing of a pile of onion sets on the lifting plowshare. Agrarnyj nauchnyj zhurnal. 2017. No 5, pp. 75–78 (in Russ.).
- Patent No 2625179 Rossiya, MPK A01 D33/00. Vykapyvayushchij lemeh dlya uborki melkosidyashchih korneplodov i luka [Lifting plowshare for cleaning small-sitting roots and onions]. A.V. Sibiryov, A.G. Aksenov, P.A. Emelyanov, S.V. Sem-

- ichev, M.A. Mosyakov. No 2016139484; Zayav. 10.10.2016; Opubl. 12.07.2017, Byul. No 20.
6. Emel'yanov P.A. Sovershenstvovanie tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv orientirovannoj posadki lukovic: dis. ... dokt. tekhn. nauk [Improvement of technology and technical means of oriented bulbs planting: Dissertation for Degree of Dr.Eng.]. Penza, 2002. 305 p.
7. Protasov A.A. Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh processov i tekhnicheskikh sredstv dlya uborki luka: diss. ... d-ra. tekhn. nauk [Improvement of technological processes and technical means for harvesting onions: Dissertation for Degree of Dr.Eng.]. Saratov, 2005. 355 p.
8. Laryushin A.M. EHnergosberegayushchie tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya uborki luka: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.20.01 [Energy-saving technologies and technical means for harvesting onions: Dissertation for Degree of Dr.Eng.]. Penza, 2010. 426 p.

*Работа выполнена при государственной поддержке молодых российских ученых – кандидатов наук МК – 4002.2018.8.*

# СЕЯЛКА С СОШНИКАМИ ДЛЯ ПОСЕВА ЗЕРНОВЫХ И РАЗНОУРОВНЕВОГО ВНЕСЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

## SEEDER WITH OPENERS FOR SOWING GRAIN AND MULTI-LEVEL APPLICATION OF MINERAL FERTILIZERS

**A.A. KEM**, к.т.н.

ФГБНУ «Омский аграрный научный центр», Омск, Россия,  
55asc@bk.ru

**A.A. KEM**, PhD in Engineering

Omsk Agricultural Research Center, Omsk, Russia,  
55asc@bk.ru

Производство зерновых культур составляет основу не только растениеводства, но и всего сельскохозяйственного производства. В системе мер по повышению урожайности возделываемых зерновых культур интенсификация производства является одной из главных при условии рационального использования удобрений. Существующие конструкции посевных машин не всегда удовлетворяют агротехническим требованиям. Внесение удобрений при посеве совместно с семенами в один рядок, из-за риска солевого эффекта и токсичного воздействия минеральных удобрений, приводит к гибели ростков всходов, и, соответственно, снижению полевой всхожести семян, и как следствие, снижению урожайности. Поэтому наиболее эффективным является раздельное от семян разноуровневое внесение минеральных удобрений. Был разработан комбинированный сошник, который выполняет двухстрочный посев зерновых с шириной рассева 50 мм при расстоянии между строками 80 мм, с одновременным внесением стартовой дозы удобрений при этом минеральные удобрения размещаются ниже уровня семян на 0,04 м, что исключает контакт между семенами и удобрениями при посеве. Проведенные в течении двух лет сравнительные полевые двух факторные исследования работы сейлок с серийными сошниками – СКП-2,1 и СКП-2,1М – об оборудованных сошниками для разноуровневого посева и внесения минеральных удобрений показали, что сейлка с экспериментальными сошниками более равномерно заделяет семена по глубине 5,40 см при среднеквадратическом отклонении 0,48 см, тогда как на посеве серийной сейлкой данный показатель составил 6,13 и 0,66 см. При посеве сейлкой с комбинированными сошниками средняя полевая всхожесть мягкой яровой пшеницы составила 94,1 %, против 80 % при посеве серийной сейлкой. По всем вариантам посева обеими сейлками с одновременным внесением стартовой дозы удобрений с разными нормами: 100, 150 и 200 кг/га была получена прибавка урожая зерна пшеницы в среднем от 9 до 22 % в сравнении с посевом без удобрения. Существенная прибавка урожая зерна 0,52 т/га, или 22 %, была получена при внесении стартовой дозы минеральных удобрений 150 кг/га сейлкой с сошниками для разноуровневого размещения удобрений в сравнении с контрольным посевом без удобрений.

**Ключевые слова:** сейлка, двухстрочный посев, семена, удобрения, комбинированный сошник, урожайность зерна.

The production of grain crops forms the basis of not only crop production, but also the entire agricultural production. The intensification of production is one of the main measures to increase the yield of cultivated crops. Existing designs of sowing machines do not always meet agrotechnical requirements. Fertilization when sown together with seeds in one row, due to the risk of salt effect and toxic effects of mineral fertilizers, leads to the death of seedlings and, accordingly, to a reduction in field germination and, as a consequence, a decrease in yield. Therefore, the most effective is separate from the seeds of multi-level application of mineral fertilizers. We have developed a combined coulter, which performs two line sowing of grain with a sieving width of 50 mm with a distance between lines of 80 mm, with simultaneous introduction of a starting dose of fertilizers, while mineral fertilizers are placed below the seed level by 0,04 m, which eliminates contact between the seeds and fertilizer when sowing. A two-year comparative field research of factor work of seed drills with serial coulters SKP-2,1 and SKP-2,1M with converted coulters for multi-level sowing and mineral fertilizers showed that the planter with experimental coulters more evenly seals seeds at a depth of 5,40 cm with a standard deviation of 0,48 cm, while at the sowing of a serial seeder this figure was 6,13 cm and 0,66 cm. When sowing with a seeder with combined coulters, the average field germination of soft spring wheat was 94,1 %, against 80 % when sowing with a serial seeder. For all sowing options with both drills and simultaneous introduction of a starting dose of fertilizers with different rates of 100, 150 and 200 kg/ha, an increase in the yield of wheat grain was obtained on average from 9 to 22 % in comparison with the sowing without fertilizer. A substantial increase in grain yield of 0,52 t/ha or 22 % was obtained with the introduction of a starting dose of mineral fertilizers 150 kg/ha with a seeder with openers for multi-level placement of fertilizers in comparison with the control sowing without fertilizers.

**Keywords:** seeder, two line sowing, seeds, fertilizers, combined coulter, grain yield.

## Введение

Одной из главных задач, влияющих на получение высокого, гарантированного урожая зерновых культур, является интенсификация производства при условии рационального использования удобрений. Решающая роль в освоении интенсивных методов возделывания зерновых отводится оптимизации пищевого режима и условий корневого питания за счет локального внесения минеральных удобрений при посеве [1, 2].

При посеве необходимо создание наилучших условий для равномерного распределения семян по площади питания и глубине заделки. Особое внимание следует уделить внесению удобрений. Припосевное внесение удобрений, совместно с высевом семян в виде стартовой дозы удобрений позволяет повысить минеральное питание растений и улучшить качество получаемого зерна. Большинство существующих сошников сеялок обеспечивают совместное с семенами внесение минеральных удобрений в один рядок, что из-за риска токсичного воздействия удобрений на растения, особенно в момент прорастания, приводит к гибели всходов и, как следствие, снижению урожайности. Поэтому наиболее эффективным способом при посеве зерновых является раздельное от семян разноуровневое внесение удобрений. Отсюда появляется необходимость совершенствования конструкции сошников [3, 4].

Современные тенденции развития посевной техники по вопросам модернизации конструкций комбинированных сошников направлены на осуществление высева семян зерновых с одновременным локальным разноуровневым внесением стартовой дозы минеральных удобрений глубже семян [5, 6, 7, 8].

## Цель исследований

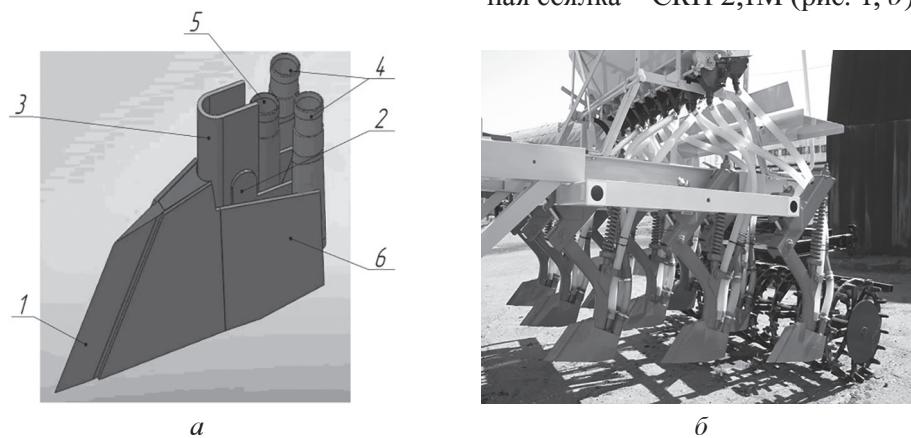
Исходя из выше изложенного, была поставлена цель исследований – разработать комбинированный сошник для двухстрочного посева зерновых с одновременным разноуровневым внесением стартовой дозы минеральных удобрений, оснастить серийную стерневую сеялку СКП-2,1 новыми сошниками и провести сравнительные полевые исследования экспериментальной и серийной сеялок.

## Материалы и методы

Для проведения лабораторно-полевых исследований серийная сеялка СКП-2,1 была оснащена новыми комбинированными сошниками для двухстрочного посева зерновых с одновременным разноуровневым внесением удобрений, таким образом получена экспериментальная сеялка СКП-2,1М. Сравнительные испытания проводились на опытном участке с серийной сеялкой СКП-2,1 с внесением удобрений в один горизонт с семенами. В качестве контрольного был принят посев сеялками без внесения удобрений. По результатам проводимых исследований нами определялись: равномерность глубины заделки семян, полевая всхожесть, а также влияния норм и способов внесения удобрения на урожай зерна яровой пшеницы. Методика закладки и условия проведения полевого сравнительного агротехнического опыта соответствовали общепринятой методике и ОСТ 10.5.1-2000 «Машины посевные. Программа и методы испытаний» [9, 10].

## Результаты исследований

Для выполнения высева семян с одновременным разноуровневым внесением минеральных удобрений был разработан комбинированный сошник (рис. 1, а) и получена переоборудованная сеялка – СКП-2,1М (рис. 1, б).



**Рис. 1. Конструкция комбинированного сошника (а); общий вид сеялки, оборудованной сошниками для двухстрочного посева и разноуровневого внесения удобрений, СКП-2,1М (б)**

При работе сеялки семена из бункера подаются высевающими аппаратами в семяпровод, а минеральные удобрения – туковысевающими аппаратами в тукопровод и далее в сошник. Сошник работает следующим образом. При движении сошника по полю долото 1, закрепленное на стойке 3, производит разрез почвы для прохода стойки. При этом долото образует в почве борозду, в которую через тукопровод 5 подаются минеральные удобрения. Стойка, проходя по уже образованной щели, ущирителями 6, расположенными с ее правой и левой стороны, раздвигает почву и формирует две бороздки, в которые через семянаправители 4 подаются семена. Разрыхленная почва при сходе с ущирителей осыпается и засыпает высеванные семена. Так как носок долота находится ниже пластин ущирителей, то удобрения размещаются по центру посева и глубже семян, а те, в свою очередь, всеваются по бокам от удобрений в две строчки, что исключает контакт между удобрениями и семенами. Следующие за сошниками кольчато-шпоровые катки сеялки уплотняют почву над семенами и удобрениями.

Полевой двухфакторный сравнительный опыт проводился на опытных полях ФГБНУ СибНИИСХ в течение двух лет (2016–2017 гг.). Сравнивались два посевных агрегата: сеялка СКП-2,1 с серийными сошниками культиваторного типа и переоборудованная сеялка СКП-2,1М с новыми сошниками для двухстрочного посева и разноуровневого внесения минеральных удобрений. За контрольный были приняты: посев пшеницы Омская-35 без удобрений и три варианта внесения удобрений аммиачной селитры с разными нормами в физическом весе 100, 150 и 200 кг/га. Каждый вариант закладывался в трехкратной повторности.

Рельеф земельного участка, выбранного под посев, – ровный с однородным почвенным типом, тип почвы – чернозем супесчаный. Условия проведения опыта включали посев пшеницы Омская-35 с нормой высева 4,5 млн всхожих зерен на гектар площади. Предшественник – вторая пшеница после пара. В течение вегетации проводилась гербицидная обработка посевов.

Посев делянок проводился сравниваемыми сеялками в агрегате с трактором МТЗ-82. Ширина делянок 8,5 м, длина 30 м, площадь одной делянки 255 м<sup>2</sup>, общее количество делянок 24 ед. Суммарная площадь опытного участка 741 м<sup>2</sup>. Перед посевом предваритель-

но была проведена предпосевная культивация участка серийной сеялкой СКП-2,1 на глубину 5 см. Все проходы при закладке полевого опыта проводились при одинаковой норме высева и глубине. Весь объем работ при закладке опыта выполнялся в течение одной рабочей смены.

Сеялка, переоборудованная комбинированными сошниками – СКП-2,1М при посеве выполняет двухстрочный посев зерновых культур с шириной распределения семян в строке 50 мм и расстоянием между засеянными строками 80 мм (рис. 2).



Рис. 2. Двухстрочный посев экспериментальным сошником

По всходам проводились исследования равномерности глубины заделки семян сравниваемых сошников, по методике измерения этиолированной части растения.

Результаты статистической обработки полученных результатов приведены в таблице.

Средний показатель глубины заделки семян при посеве: сеялкой с экспериментальным сошником составил 5,40 см, контрольной сеялкой – 6,13 см. Величина среднеквадратического отклонения при посеве экспериментальной сеялкой составила 0,48, что соответствует агротехническим требованиям для зерновых культур ( $\pm 1,0$ ) см.

Наблюдения за динамикой относительной полевой всхожести осуществлялись следующим образом. В первый день появления всходов на делянках с помощью меток обозначались стационарные площадки длиной 0,5 м и шириной 1,0 м из расчета 3 повторности на каждом из вариантов и проводился подсчет взошедших растений. Далее подсчет появившихся растений велся через день с нарастающим итогом до момента, когда в течение 2–3 дней количество

Таблица

## Результаты статистической обработки глубины заделки семян

Показатели	Результаты расчетов	
	СКП-2,1М (эксперимент)	СКП-2,1 (контроль)
Средняя глубина заделки $x$ , см	5,40	6,13
Среднеквадратическое отклонение $\sigma$ , см	0,48	0,66
Коэффициент вариации $V$ , %	14,13	15,36
Ошибки средней выборки $P$ , см	0,088	0,137
Относительная ошибка средней выборки $P$ , %	2,14	2,44

всходов на площадке оставалось постоянным или увеличивалось на 1–2 растения.

Количество взошедших растений в первый день наблюдений на делянках, засеянных экспериментальной сеялкой, в сравнении с серийной было на 13 % больше, а в конце наблюдений разница составляла от 20 до 22 %. На делянках, где посев производился сеялкой СКП-2,1М, максимальное количество взошедших растений было получено на одиннадцатый день наблюдений и составляло от 405 до 414 растений на одном квадратном метре. На делянках, засеянных серийной сеялкой, максимум всходов был получен на 14-й день наблюдений при этом количество растений на одном квадратном метре было от 350 до 360 шт.

Таким образом, в среднем за два года наблюдений при посеве переоборудованной сеялкой с двухстрочным сошником и разноуровневым внесением удобрений с нормой высеяна 4,5 млн всх. зерен/га полевая всхожесть составила 94,1 %, а при посеве серийной сеялкой СКП-2,1 – только 80 %.

Это объясняется тем, что при посеве сеялкой с сошниками для разноуровневого двухстрочного посева минеральные удобрения размещаются по центру рядка и ниже уровня высеванных семян на 0,04 м, что позволило исключить прямой контакт между семенами и удобрениями, и привело к повышению полевой всхожести.

Уборка и учет урожайности проводился в стадии полной спелости зерна селекционным комбайном Хейге-125. Перед началом уборки были проведены раскосы делянок, после чего сделали замеры фактической площади каждой делянки. Урожайность зерна пересчитывалась на стандартные показатели влажности 14 и 100 % чистоту. Результаты средней урожайности зерна мягкой яровой пшеницы Омская-35 в зависимости от способа посева и нормы внесения стартовой дозы минеральных удобрений за два года приведены на рис. 3.

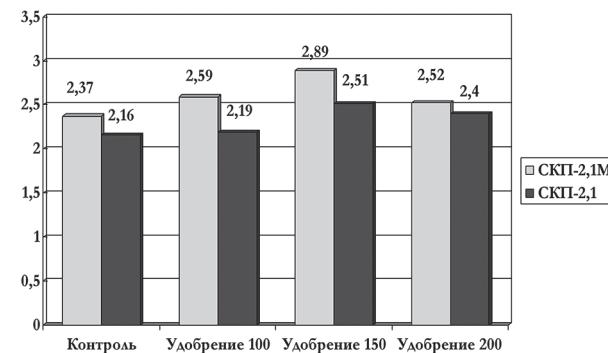


Рис. 3. Средняя урожайность зерна (т/га) яровой пшеницы Омская-35 (2016–2017 гг.) в зависимости от способа посева и нормы внесения удобрений НСР<sub>05</sub> = 0,14

Анализ полученных результатов показал, что на контролльном посеве без удобрений сеялкой с новыми сошниками в сравнении с серийной СКП-2,1 прибавка зерна составляла до 9 %. Внесение стартовой дозы удобрений по всем вариантам посевов давало прибавку урожая зерна в среднем от 9 до 22 % в сравнении с контролем (посев без удобрений). Существенная прибавка урожая зерна в размере 0,52 т/га, или 22 %, (в сравнении с контролем) на посеве переоборудованной сеялкой СКП-2,1М была получена при стартовой дозе внесения аммиачной селитры 150 кг/га в физическом весе, и 33 % – в сравнении с контрольным посевом серийной сеялкой.

## Выводы

Глубины заделки семян при посеве экспериментальными сошниками составила 5,40 см при среднеквадратическом отклонении 0,48 см, что соответствует агротехническим требованиям. Сеялка с комбинированными сошниками позволяет выполнять двухстрочный посев и одновременно вносить минеральные удобрения ниже уровня семян. При таком способе посева устраняется прямой контакт между семенами и удобрениями, за счет чего полевая всхожесть повышается на 12 %.

Существенная прибавка урожая зерна переоборудованной сеялкой в сравнении с контролем была получена при внесении стартовой дозы минеральных удобрений аммиачной селитры 150 кг/га и составила 0,52 т/га, или 22 %, а в сравнении с контрольным посевом серийной сеялкой прибавка составила 33 %, что показывает эффективность применения разработанного сошника.

## Литература

1. Петухов Д.А., Чаплыгин М.Е., Назаров А.Н. Инновационные проекты, новые технологии и оборудование // Техника и оборудование для села. 2013. № 4. С. 10–14.
2. Демчук Е.В. Голованов Д.А., Янковский К.А. К вопросам совершенствования технологии посева зерновых культур // Тракторы и сельскохозмашин. № 6. 2016. С. 45–48.
3. Ногтиков А.А., Бычков В. П. Развитие конструкций комбинированных рабочих органов посевных машин // Достижения науки и техники АПК. 2002. № 1. С. 25–26.
4. Домрачев В.А., Кем А.А., Ковтунов В.Е., Красильников Е.В., Шевченко А.П. Механизация процессов селекции, земледелия и растениеводства. Омск.: Издательство ФГБОУ ВПО ОмГАУ им. П.А. Столыпина, 2011. 190 с.
5. Миних Д.Б., Мальцев В.В., Волков Е.Д., Гавар С.П. Сеялка с комбинированными сошниками для зерновых культур и локального внесения удобрений // Науч.-техн. бюл. ВАСХНИЛ. Сиб. отд-ние. СибНИИСХ. 1988. Вып. 6. С. 3–6.
6. Кем А.А. Сошник для разноуровневого внесения удобрений и двухстрочного посева зерновых // Научно-техническое обеспечение АПК Сибири: материалы Междунар. науч.-технич. конф. Новосибирск, 2017. Т. 1. С. 143–148.
7. Демчук Е.В., Милюта В.В. Комбинированный сошник зерновой сеялки // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2014. № 1. С. 81–83.
8. Кем А.А., Миклашевич В.Л., Чекусов М.С. Сошник для двухстрочного посева зерновых культур с разноуровневым внесением минеральных удобрений // Вестник Омского государственного университета. 2017. № 2. С. 105–111.
9. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
10. ОСТ 10.5.1.-2000. Испытание сельскохозяйственной техники. Машины посевные. Методы оценки функциональных показателей. Введ. 15.06.2000. М.: Минсельхозпрод России, 2000. 72 с.

## References

1. Petuhov D.A., CHaplygin M.E., Nazarov A.N. Innovative projects, new technologies and equipment. Tekhnika i oborudovanie dlya sela. 2013. No 4, pp. 10–14 (in Russ.).
2. Demchuk E.V. Golovanov D.A., YAnkovskij K.A. Improving the technology of sowing crops. Traktory i sel'sko-hozyajstvennye mashiny. 2016. No 6, pp. 45–48 (in Russ.).
3. Nogtikov A.A., Bychkov V. P. The development of structures of combined working bodies of sowing machines. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2002. No 1, pp. 25–26 (in Russ.).
4. Domrachev V. A., Kem A.A., Kovtunov V.E., Krassil'nikov E.V., Shevchenko A.P. Mekhanizaciya processov selekcii, zemledeliya i rastenievodstva [Mechanization of breeding, farming and crop production]. Omsk.: Izdatel'stvo FGBOU VPO OmGAU im. P.A. Stolypina Publ., 2011. 190 p.
5. Minikh D.B., Mal'cev V.V., Volkov E.D., Gavar S.P. Seeder with combined coulters for grain crops and local fertilization. Nauch.-tekhn. byul. VASKH-NIL. Sib. Otd-nie. SibNIISKH. 1988. Vyp. 6, pp. 3–6 (in Russ.).
6. Kem A.A. Coulter for multi-level fertilization and two-line sowing of grain. Scientific and technical support of the agro-industrial complex of Siberia: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. Novosibirsk [Materials of the Intern. scientific tech. conf. Novosibirsk], 2017. Vol. 1, pp. 143–148 (in Russ.).
7. Demchuk E.V., Myalo V.V. Combine seed drill coulter. Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2014. No 1, pp. 81–83 (in Russ.).
8. Kem A.A., Miklashevich V.L., ChEkusov M.S. Coulter for two-line sowing of grain crops with multi-level application of mineral fertilizers. Vestnik Omskogo gosudarstvennogo universiteta. 2017. No 2, pp. 105–111 (in Russ.).
9. Dospekhov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovanij) [Methods of field experience (with the basics of statistical processing of research results)]. 5-e izd., dop. i pererab. Moscow: Agropromizdat Publ., 1985. 351 p.
10. OST 10.5.1.-2000. Ispytanie sel'skohozyajstvennoj tekhniki. Mashiny posevnye. Metody ocenki funkcional'nyh pokazatelej [Testing of agricultural equipment. Sowing machines. Methods for assessing functional performance.]. Vved. 15.06.2000. Moscow: Minsel'hozprod Rossii Publ., 2000. 72 p.

# ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АГРЕГАТА ДЛЯ СОВМЕЩЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ ПОСЕВА И ВНЕСЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО ГИДРОГЕЛЯ В ПОЧВУ

## JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE UNIT FOR COMBINING THE SOWING OPERATIONS AND THE INTRODUCTION OF POLYMER HYDROGEL IN THE SOIL

В.Ю. РЕВЕНКО, к.т.н.

Армавирская опытная станция – филиал ФГБНУ ФНЦ  
ВНИИМК, Армавир, Россия, armavirimrev@rambler.ru

В.Ю. REVENKO, PhD in engineering

Armavir Experimental Station – a Branch of FGBNU FNC  
VNIIMK, Armavir, armavirimrev@rambler.ru

Один из способов сохранения посевов сельскохозяйственных культур в зонах недостаточного увлажнения – заделка в почву различных абсорбентов, способствующих сохранению влаги в корнеобитаемом слое почвы. В последние годы в качестве абсорбентов применяются полимерные гидрогели, способные впитывать влагу в объеме, в тысячу раз превышающем объем гранул полимера. Однако вопросы практического использования гидрогелей в полевых севооборотах в настоящее время недостаточно проработаны. В статье приведены материалы трехлетних исследований по изучению физических свойств полимерных гидрогелей и их взаимодействия с растительным материалом. На основании полученных данных дается обоснование конструктивно-технологических параметров агрегата для комплексного внесения семян и сухих гранул полимера в почву. По результатам практического использования различных машин, совмещающих посев и внесение абсорбента влаги в почву, предлагается вариант машино-тракторного агрегата с использованием селекционной сеялки точного высева с микропроцессорным управлением. На сеялку были смонтированы четыре бункера-дозатора барабанно-лопастного типа. Конструктивная схема дозатора включала: вращающуюся шестерню, червячный редуктор и 12-вольтовый электромотор. Дозировка полимерного абсорбента производилась с места оператора при помощи ШИМ-регулятора частоты вращения электродвигателя. Наличие в комплектации сеялки 4 полозовидных и 4 двухдисковых сошников позволило использовать первый комплект для высева семян, а второй – для внесения в почву гидрогеля на заданную глубину. Постоянный мониторинг влажности в метровом слое почвы показал, что заделка в почву полимерного гидрогеля способствовала росту влагонасыщенности прикорневой зоны, снижению потерь влаги на физическое испарение, уменьшению ее гравитационного стока в нижележащие слои. Проведенные полевые испытания модернизированной сеялки показали, что ее использование в зонах неустойчивого увлажнения позволяет повысить урожайность сои на 5,5–12 %, в зависимости от количества выпадающих осадков. Особенно эффективно применение данной машины в селекции и семеноводстве с целью обеспечения оптимальных по увлажнению условий для вегетации растений в гибридных и селекционных питомниках.

**Ключевые слова:** селекционная сеялка, совмещение операций, полимерный гидрогель, соя.

One of the ways to preserve crops in areas of insufficient moisture is the incorporation into the soil absorbents that help preserve moisture in the root zone of the soil. In recent years, polymer hydrogels have been used as absorbents that can absorb moisture in a volume that is a thousand times larger than the volume of polymer granules. However, the issues of practical use of hydrogels in field crop rotations are currently insufficiently developed. The article presents the materials of three-year studies on the physical properties of polymer hydrogels and their interaction with plant material. On the basis of the data obtained, the substantiation of the design and technological parameters of the unit for the complex application of seeds and dry polymer granules into the soil is given. According to the results of the practical use of various machines that combine sowing and introduction of absorbent into the soil, a variant of the machine-tractor unit with the use of a selection seeder of precise sowing with microprocessor control is proposed. Four metering hoppers of drum-blade type were mounted on the seeder. The design of the dispenser included: a rotating gear, a worm gear and a 12-volt electric motor. The dosage of the polymer absorbent was made from the operator's seat, with the help of PWM-motor speed controller. The presence in the configuration of the seeder 4 tyne coulters and 4 double-disc coulters are allowed using the first set for sowing seeds, and the second – for introducing a hydrogel into the soil to a predetermined depth. Constant monitoring of moisture in the meter layer of soil showed that the incorporation of the polymer hydrogel into the soil contributed to an increase of moisture saturation of the root zone, reducing moisture losses for physical evaporation, and a decrease in its gravity flow to the underlying layers. The field tests of the modernized seeder showed that its use in areas of unstable moistening can increase the yield of soybeans by 5,5–12 %, depending on the amount of precipitation. Especially effective is the use of this machine in breeding and seed production, in order to provide optimal moisture conditions for vegetation of plants in hybrid and breeding nurseries.

**Keywords:** selection seeder, combination of operations, polymer hydrogel, soy bean.

## Введение

Погодные условия в зонах недостаточного увлажнения отрицательно влияют на сохранность посевов сельскохозяйственных культур. Снизить стрессовые нагрузки на растения, вызванные неблагоприятными погодно-климатическими условиями можно различными способами, в том числе с помощью абсорбентов почвенной влаги. В качестве абсорбентов используются различные композиты (производные торфа, минеральных мелиораторов) или полимерные гидрогели (водопоглощающие полимеры на основе акриламида). Последние являются наиболее эффективными абсорбентами, так как способны удерживать количество воды, превышающее их массу в 300–1000 раз. Однако распространение гидрогелей сдерживается их высокой стоимостью, обусловленной необходимостью импорта данного продукта в РФ. Ведущиеся в настоящее время работы по синтезированию экологически безопасных полимерных гидрогелей из отечественного сырья позволяют существенно снизить их стоимость и повысить привлекательность данного продукта. Для селекционных же целей использование дорогостоящих абсорбентов почвенной влаги с целью сохранения единичных растений на участках гибридизации или редких популяций в селекционных питомниках экономически оправдано уже сейчас [1].

Анализ многочисленных исследований отечественных и зарубежных ученых по технике и технологии применения гидрогелей в растениеводстве, овощеводстве, виноградарстве, декоративном садоводстве и др. отраслях сельского хозяйства показал, что данный агроприем недостаточно проработан, особенно применительно к полевым севооборотам и культурам, остро реагирующим на недостаток влаги в почве [2, 3, 4]. Не решены вопросы, связанные с дозировкой абсорбента, глубиной внесения его в почву, взаимодействия полимерных гранул с корневой системой растений и др. Главное – отсутствует комплекс машин для реализации данной влагосберегающей технологии на практике.

## Цель исследования

Целью исследования является обоснование конструктивно-технологических параметров агрегата для комплексного внесения семян и сухих гранул полимера в почву.

## Материалы и методы

Решением некоторых из вышеперечисленных проблем на Армавирской опытной станции начали заниматься в 2016 г. Лабораторные и полевые исследования проводили при возделывании сои, в соответствии с общепринятыми методиками [5]. Почвенный покров полей опытной станции представлен черноземом обыкновенным тяжелосуглинистым. Предшественник в опытах – озимая пшеница. Повторность – четырехкратная, размещение вариантов – рандомизированное. Длина делянки 15 м, ширина 2,8 м. Посев сои осуществляли доработанной на станции четырехрядной селекционной сеялкой «Клен-2,8». Модернизацию сеялки проводили ежегодно с учетом результатов испытаний, полученных в предыдущие годы. В качестве абсорбента влаги использовали мелкогранулированный (0,1–0,2 мм) полимерный гидрогель «Штокосорб-660», который вносили в дозе 400 кг/га на глубину 8–9 см одновременно с посевом сои. Контрольные участки возделывались по традиционной технологии.

## Результаты и обсуждение

Вопросы практического применения полимерных гидрогелей не так просты, как они описаны в рекомендациях фирм-производителей. Например, заявленный ими коэффициент удержания влаги, равный 1000, на практике достигнут так и не удалось. Известно, что в почвенной влаге растворено большое количество различный химических элементов, в том числе и солей. На рис. 1 приведены кинетические кривые набухания гидрогеля при использовании воды различной степени минерализации.

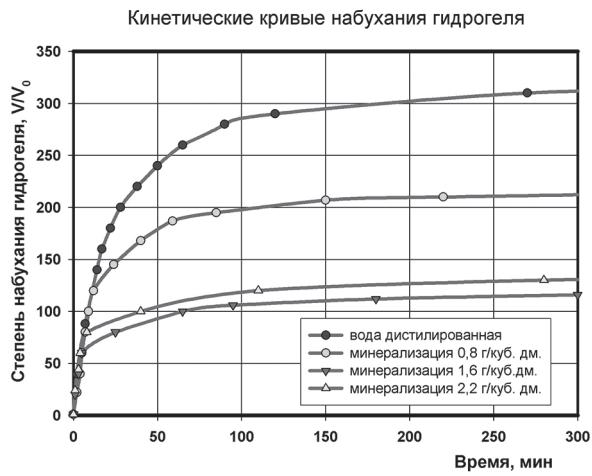


Рис. 1. Кинетические кривые набухания полимерного гидрогеля в различных водных средах

Максимальный коэффициент удержания влаги (или коэффициент набухания  $K_h$ ) был получен при добавлении в колбу с сухими гранулами дистиллированной воды и составил  $K_h = 310$ . Добавление в колбу воды с уровнем минерализации 0,8 г/дм<sup>3</sup> снизило данный показатель до 210. Слабоминерализованная (1,6 г/дм<sup>3</sup>) вода понизила  $K_h$  до 130, а маломинерализованная (2,2 г/дм<sup>3</sup>) – 118. Таким образом, гидrogели по-разному впитывают влагу с различным химическим составом.

Далее абсорбционные способности гидрогелей в высокой степени зависят от глубины залегания в почве, т.е. чем выше слой почвы над гранулами полимера, тем меньше его влагопоглощающая способность. В результате, заделка гидрогеля в почву на глубину больше оптимальной может существенно снизить его эффективность. На рис. 2 отражены результаты лабораторных опытов по оценке потенциальных возможностей мелкогранулированного гидрогеля, расположенного в грунте на разной глубине. При закладке гидрогеля под слой почвы высотой 6 см коэффициент набухания был равен  $K_h = 54$  под слой в 10 см –  $K_h = 42$ . Увеличение глубины залегания полимера до 13 см снизило его влагопоглощающие способности до  $K_h = 35$ . Следует добавить, что абсорбционные способности гидрогелей также зависят от структуры и размера частиц исходного вещества. Поглотительные способности полимеров, изготовленных в виде микрогоанул (0,1–0,2 мм) и в виде гранул размером 0,3–0,6 мм, существенно различаются.

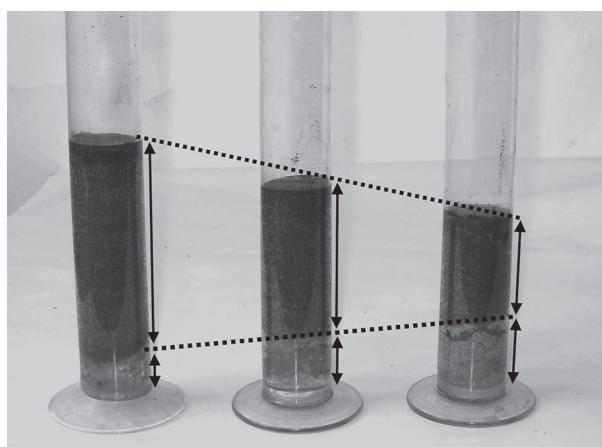


Рис. 2. Влияние глубины залегания полимерного гидрогеля на его влагопоглощающую способность

Таким образом, способность гидрогеля абсорбировать влагу в высокой степени зависит от глубины его закладки в почву, химического состава аккумулируемой влаги, размера гранул полимера. Заявленные же производителями физические характеристики полимерных гидрогелей не всегда соответствуют результатам, полученным на практике.

Проведенные нами исследования показали, что посадка семян сои непосредственно в гидрогель приводит к их кислородному голоданию, угнетению в развитии и нередко – к последующей гибели. Лабораторные опыты с прозрачными сосудами и полевые опыты показали, что полимерный гидрогель должен находиться ниже глубины залегания посевного материала, но не глубже 15 сантиметров от поверхности [6]. В случае залегания в нижних горизонтах влагопоглощающая эффективность полимерных абсорбентов резко падает, особенно на тяжелосуглинистых почвах. Ленточная закладка гидрогеля на глубину менее 5 см от поверхности почвы приводит к образованию трещин, через которые начинается интенсивное испарение влаги, удерживаемой почвой и гранулами полимера.

В результате первоначально проведенных исследований (в 2016 г.) были сформулированы основные требования к агрегату для внутрив почвенного внесения полимерных абсорбентов: а) операции посева и внесения в почву гидрогеля в почву должны быть совмещены; б) гидрогель должен вноситься в почву в виде ленты, идущей параллельно с высеванными семенами на расстоянии 60–80 мм от линии семян и на 20–40 мм глубже семенного ложа; в) доза вносимого в почву гидрогеля должна быть не ниже 100 кг/га, а максимальная эффективность полимерных абсорбентов достигается при дозе 400 кг/га [7].

Учитывая направленность работ Армавирской опытной станции, в качестве объекта модернизации была выбрана селекционная сеялка «Клен-2,8», т.к. она оснащена микропроцессорным блоком, который позволяет автоматизировать процесс высева делянок и дозирования полимерного гидрогеля (рис. 3). С пульта управления можно быстро изменять требуемые параметры высева и длины делянок, а норма высева семян, как и норма внесения абсорбента, может быть скорректирована по каждому высевающему аппарату. Отметим, что сеялка на практике обеспечивает заданные



**Рис. 3. Общий вид модернизированного агрегата**

требования к равномерности и глубине заделки семенного материала в почву, в основном, благодаря тому, что каждая из высевающих секций оснащается вращающейся вакуумной камерой с микропроцессорным управлением.

Поиск наиболее эффективной конструкции устройства для внесения полимерного гидрогеля в почву проводился с использованием нескольких макетных образцов, изготовленных на Армавирской опытной станции. Первоначально для дозировки требуемого количества полимерного абсорбента использовались тарельчато-дисковые дозаторы со скребковым сбрасывателем, которые применяют в туковысевающих аппаратах, устанавливаемых на сажалках и культиваторах-растениепитателях. Дно высевающей банки такого аппарата было сделано вращающимся и приводилось в движение от опорных колес сеялки. Количество вносимого в почву полимера в каждом аппарате регулировали при помощи заслонок. Данная конструкция отличалась стабильностью работы, полным отсутствием забивания, но ее габаритные, весовые и технологические параметры не отвечали требованиям, предъявляемым к модернизируемому агрегату. Во-первых, регулировка дозы внесения гидрогеля с помощью заслонки осуществлялась в крайне узких пределах, требуя дополнительной корректировки скоростью движения агрегата, в ущерб качественным показателям технологического процесса высева семян. Во-вторых, мелкодисперсные варианты гидрогелей частично просыпались сквозь зазор между тарелкой и банкой, увеличивая непроизводительные потери дорогостоящего полимера. В третьих, передача вращения от опорных колес к высевающей тарелке чрезвычайно усложняла кон-

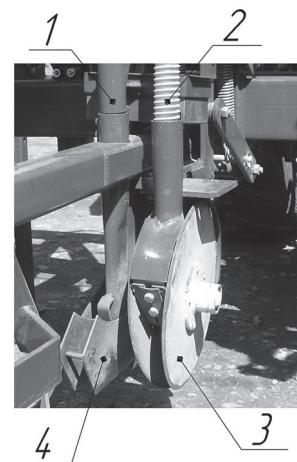
струкцию сеялки и процесс настройки нормы внесения сыпучего материала в почву.

С целью повышения эффективности внесения полимерного препарата была разработан дозатор барабанно-лопастного типа. Его конструктивная схема включала вращающуюся шестерню, изготовленную из полипропилена и приводимую в движение 12-вольтовым электромотором через встроенный червячный редуктор. Для исключения возможного заклинивания гидрогеля в зонах сопряжения подвижных и неподвижных элементов в конструкцию были внедрены демпфирующие элементы.

Дозировка полимерного абсорбента производилась с места оператора при помощи ШИМ-регулятора частоты вращения приводного электродвигателя. Отметим, что использование широтно-импульсной модуляции позволило повысить КПД электромеханической передачи и надежность технологического процесса дифференцированного внесения гидрогеля в целом.

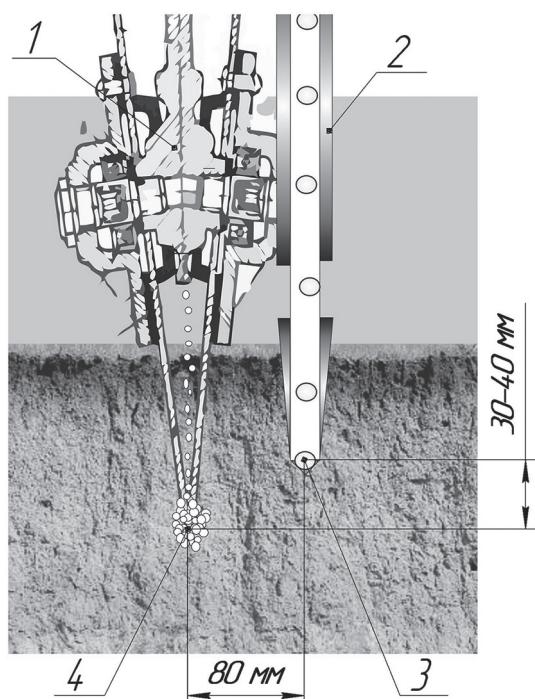
Бункер для сыпучего полимерного материала был установлен над дозатором. Подвод материала к сошникам осуществляли посредством полуупрозрачных тукопроводов. Наличие в комплектации 4 полозовидных и 4 двухдисковых сошников позволило использовать первый комплект для высева семян, а второй – для внесения гидрогеля.

На рис. 4 представлена конструкция сошникового блока для комплексного внесения гидрогеля и посева семян. Двухдисковые сошники 3 с помощью опорной площадки закреплены на параллелограммной подвеске совместно с полозовидными 4. В результате оба сошника хорошо



**Рис. 4. Конструкция сошникового блока для комплексного внесения гидрогеля и посева семян:**  
 1 – семяпровод; 2 – тукопровод; 3 – двухдисковый сошник, 4 – полозовидный сошник

копировали рельеф поля, а прикатывающие катки, одновременно выполняющие роль ограничителей глубины хода сошников, заделывали образовавшиеся борозды. Схема взаимного расположения сошников приведена на рис. 5. Установка проставок между опорными площадками дисковых и полозовидных сошников позволяла регулировать глубину внесения полимерного абсорбента.



**Рис. 5. Схема взаимного расположения полозовидного и двухдискового сошников в почве:**  
1 – двухдисковый сошник; 2 – полозовидный сошник; 3 – семена сои; 4 – гранулы полимерного гидрогеля

Проведенные нами испытания модифицированной селекционной сеялки в полевых условиях показали, что изменение скорости движения агрегата с 0,5 до 2 м/с не влияло на качество заделки полимерного абсорбента в почву. Среднее отклонение глубины залегания гидрогеля от заданной составило  $\pm 1$  см, отклонение дозы внесенного материала на одном погонном метре – менее 5 %, при рекомендуемой рабочей скорости движения агрегата, равной 1 м/с. При увеличении скорости движения агрегата до 2 м/с отклонение дозы составило 8 %.

Полевые опыты по проверке влияния полимерных абсорбентов на продуктивность сои в 2017 г. выявили, что на делянках с внесенным в межурядья полимерным гидрогелем урожайность сои составила 2,43 т/га, что на 12 %

выше, чем на контроле. Повторные опыты, проведенные в 2018 г., (при других погодных условиях) также подтвердили эффективность использования агрегата для совмещения операций. На делянках с гидрогелем достоверный прирост урожайности сои составил 5,5 %.

Постоянный мониторинг влажности в метровом слое почвы показал, что заделка в почву полимерного гидрогеля способствовала росту влагонасыщенности прикорневой зоны, снижению потерь влаги на физическое испарение, уменьшению ее гравитационного стока в нижележащие слои. Находясь в гелеобразном состоянии, влага способствовала оптимизации водного режима питания растений сои, повышая их продуктивность.

## Выводы

Таким образом, на практике была доказана эффективность предлагаемых технических решений, являющихся составными звенями технологического процесса дозированного внесения полимерных гидрогелей в почву на заданную глубину, на заданное расстояние от семенного ложа.

Проведенные полевые испытания разработанного агрегата показали, что его использование в зонах неустойчивого увлажнения позволяет повысить урожайность сои на 5,5–12 %, в зависимости от погодных условий. Особенно эффективно применение данной машины в селекции и семеноводстве с целью обеспечения оптимальных по увлажнению условий для вегетации растений в гибридных и селекционных питомниках.

В результате проведенных исследований предложены:

- схема агрегата для внутривспашенного внесения полимерных абсорбентов в межурядья;
- конструктивные и режимные параметры модернизированной селекционной сеялки для проведения совмещенных операций.

## Литература

- Ревенко В.Ю., Зайцев Р.Н. Изменение влагобезспеченности сельскохозяйственных культур в восточной зоне Краснодарского края // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. № 5 (88). Ч. 6. С. 9–12.
- Старовойтов В.И., Старовойтова О.А., Манохина А.А. Возделывание картофеля с использованием влагосберегающих полимеров // Техника и технологии АПК. 2015. № 1. С. 15–18.

3. Гундырин В.Н., Годунова Е.И., Шкабарда С.Н. Использование гидрогеля в зоне неустойчивого увлажнения Ставрополья // Земледелие. 2014. № 6. С. 37–38.
  4. Demitri C. Potential of Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogels as Water Reservoir in Agriculture // Department of Engineering for Innovation. University of Salento. 2013. 79 p.
  5. Методика проведения полевых агротехнических опытов с масличными культурами / под общ. ред. В.М. Лукомца. Краснодар. 2010. 328 с.
  6. Агафонов О.М., Ревенко В.Ю. Возможности полимерного гидрогеля как накопителя почвенной влаги в зоне неустойчивого увлажнения Краснодарского края // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2017. № 10. С. 35–38.
  7. Зайцев Р.Н., Ревенко В.Ю., Агафонов О.М. Влияние полимерных абсорбентов и мульчирующих материалов на сохранность запасов почвенной влаги и урожайность сои // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень Всероссийского научно-исследовательского института масличных культур. 2017. № 3 (171). С. 65–72.
- References**
1. Revenko V.Yu., Zaitsev R.N. Change in moisture supply of agricultural crops in the eastern zone of the Krasnodar Territory // Actual problems of the humanities and natural sciences. 2016. No 5 (88). Vol. 6, pp. 9–12.
  2. Starovoitov V.I., Starovoytova O.A., Manokhina A.A. Potato cultivation using moisture-saving polymers // Technique and technology of the agro-industrial complex. 2015. No 1, pp. 15–18.
  3. Gundyrin V.N., Godunova E.I., Shkabarda S.N. Use of hydrogel in the zone of unstable moistening of the Stavropol region // Agriculture. 2014. No 6, pp. 37–38.
  4. Demitri C. Potential of Cellulose-Based Superabsorbent Hydrogels as Water Reservoir in Agriculture // Department of Engineering for Innovation. University of Salento. 2013. 79 p.
  5. Methods of conducting field agrotechnical experiments with oilseeds / Under total. ed. by V.M. Lukomets. Krasnodar. 2010. 328 p.
  6. Agafonov OM, Revenko V.Yu. Possibilities of polymer hydrogel as a storage of soil moisture in the zone of unstable moistening of the Krasnodar Territory // International Journal of Humanities and Natural Sciences. 2017. No 10, pp. 35–38.
  7. Zaitsev, R.N., Revenko V.Yu., Agafonov O.M. The influence of polymeric absorbents and mulch materials on the safety of soil moisture reserves and soybean yield // Oilseeds. Scientific and technical bulletin of the All-Russian Scientific Research Institute of Oilseeds. 2017. No 3 (171), pp. 65–72.

# РАЗВИТИЕ ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНЦЕПЦИИ ТРАКТОРА

## THE DEVELOPMENT OF THE TECHNICAL CONCEPT OF THE TRACTOR

**Г.М. КУТЬКОВ,** д.т.н.

РГАУ–МСХА им. Т.А. Тимирязева, Институт механики и энергетики им. В.П. Горячина, Москва, Россия,  
gkutkov@yandex.ruG.M.

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

Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Institute of Engineering and energy named after V.P. Goryachkin, Moscow, Russia,  
gkutkov@yandex.ru

Анализируется развитие технической концепции сельскохозяйственного колесного трактора в зависимости от непрерывного роста его энергонасыщенности как непременного фактора повышения технического уровня. Рассмотрены технологические свойства и способы агрегатирования тракторов трех поколений энергонасыщенности, получивших названия тяговой, тягово-энергетической и энергетической концепций. В настоящее время в мировом тракторостроении практически сняты с производства тракторы тяговой концепции, выпускаются в основном тракторы тягово-энергетической концепции и в меньшем количестве – энергетической концепции. Тракторы второго поколения отличаются от тракторов первого поколения тем, что включают в заводскую комплектацию балласт. Балластирование стало необходимым способом искусственного увеличения веса трактора и понижения его энергонасыщенности вследствие ограничения скорости выполнения технологических операций, введенного правилами агротехники. Предполагается, что в обозримом будущем это ограничение не будет снято. Уже в настоящее время балластирование, как способ компенсации снижения веса трактора, практически исчерпало свои возможности, потому что балластные грузы достигают половины веса трактора и более. По мере дальнейшего непрерывного повышения энергонасыщенности трактора и сохранения ограничений по скорости выполнения технологических операций балластирование потребует замены. В статье предлагается вместо балластирования использование третьего подкатного моста и системы блочно-модульного агрегатирования, а также применение на тракторах третьего поколения электрической трансмиссии и активного привода на мотор-колесах сельскохозяйственных машин. Показано, что тракторы второго поколения обладают потенциальными технологическими свойствами, которые могут быть реализованы при условии грамотного и удобного в эксплуатации маневрирования уровнем балластирования. В целом, применение тракторов второго и третьего поколений – тягово-энергетической и энергетической концепций – позволит существенно снизить: материалоемкость МТА; расход топлива; вредное воздействие движителей трактора на почву; разномарочность (различие тракторов по параметру номинального тягового усилия на крюке) тракторов в хозяйстве.

**Ключевые слова:** трактор, балластирование, материалоемкость, энергонасыщенность, технический уровень, техническая концепция, технологические свойства, электрическая трансмиссия.

The development of the technical concept of an agricultural wheeled tractor is analyzed depending on the continuous growth of its energy saturation, as an indispensable factor in raising the technical level. The technological properties and methods of aggregating tractors of three generations of energy saturation called traction, traction energy and energy concepts, are considered. At present, in the world tractor construction, tractors of the traction concept are almost out of production; tractors of power traction and, to a lesser extent, energy concepts, are mainly produced. Tractors of the second generation differ from tractors of the first generation that they include ballast in a factory complete set. Ballasting has become a necessary way to artificially increase the weight of the tractor and reduce its energy saturation due to the limitation of the speed of technological operations, introduced by the rules of agricultural engineering. It is assumed that in the foreseeable future this restriction will not be removed. Even now, ballasting as a way to compensate for the weight loss of the tractor has almost exhausted its possibilities, because ballast weights reach half of the tractor weight and more. As the tractor continues to increase its energy saturation and maintains limitations on the speed of technological operations, the ballasting will require replacement. The article proposes instead of ballasting the use of a third movable axle and a block-modular aggregation system, as well as the use of electric transmission on the third-generation tractors and an active drive to the motor-wheel of agricultural machinery. It is shown that the second generation tractors have potential technological properties that can be implemented under the condition of competent and easy to operate maneuvering level of ballasting. In general, the use of tractors of the second and third generations of traction energy and energy concepts will significantly reduce: the material intensity of machine tractor unit; fuel consumption; the harmful effects of tractor propellers on the soil, variability (the difference of tractors in terms of the nominal tractive force on the hook) of tractors in the economy.

**Keywords:** tractor, ballasting, material consumption, energy saturation, technical level, technical concept, technological properties, electrical transmission.

## Введение

Основная закономерность развития техники состоит в непрерывном снижении материальноемкости и габаритных размеров машины настолько, насколько это не приводит к ухудшению показателей ее функционального назначения. Со временем возникновения трактора как машины, пришедшей на замену живой тяговой силы, снижение материальноемкости и повышение энергонасыщенности использовалось для увеличения его скорости. Вследствие этого повышались технологические свойства трактора и производительность МТА. При достижении предельной по агротехническим условиям скорости движения МТА и дальнейшем непрерывном повышении энергонасыщенности возникающий «избыток» мощности двигателя стали использовать для повышения силы тяги трактора, а не скорости. Таким образом возникла необходимость непрерывного балластирования трактора. По мере непрерывного повышения энергонасыщенности трактор становился все легче, а вес балласта нарастал. Вследствие разных путей повышения технического уровня трактора и совершенствования технологий сельскохозяйственного производства нарушилась устойчивая зависимость: повышение технологических свойств перестало сопутствовать повышению технического уровня трактора. В настоящее время большинство выпускаемых тракторов обладают повышенной энергонасыщенностью и потенциальными возможностями повышения технологических свойств, которые практически не используются. С течением времени эта ситуация усугубляется.

Возникло три проблемы:

- как использовать повышение технического уровня трактора для улучшения его технологических свойств;
- каким способом заменить балластирование в перспективе, так как уже в настоящее время этот способ практически исчерпал свои возможности;
- создать технический облик трактора третьего поколения – энергетической концепции.

## Цель исследования

Рассмотреть вопросы, сопутствующие снижению материальноемкости трактора, а именно:

- развитие технической концепции трактора;
- влияние изменения технической концепции на технологические свойства трактора;

– преемственность способа агрегатирования трактора и с.-х. машины при переходе трактора на очередную стадию развития технической концепции.

## Результаты исследования и их обсуждение

### Развитие технической концепции трактора.

Развитие технической концепции трактора рассмотрено с опорой на прогноз развития конструкции трактора, который изложен в работах [1] и [2], выполненных в начале 80-х годов прошлого столетия. В работе [3] показано, что в настоящее время этот прогноз успешно реализовывается. На рис. 1 приведен график развития энергонасыщенности (величина, обратная материальноемкости) трактора по мере повышения его технического уровня. По оси абсцисс отложено время, а по оси ординат – энергонасыщенность трактора. Приведенные на рисунке логисты I, II и III показывают, что трактор в своем развитии должен пройти три стадии, каждая из которых характеризуется своей технической концепцией, определяемой уровнем энергонасыщенности  $\mathcal{E}_{tp}$  трактора.

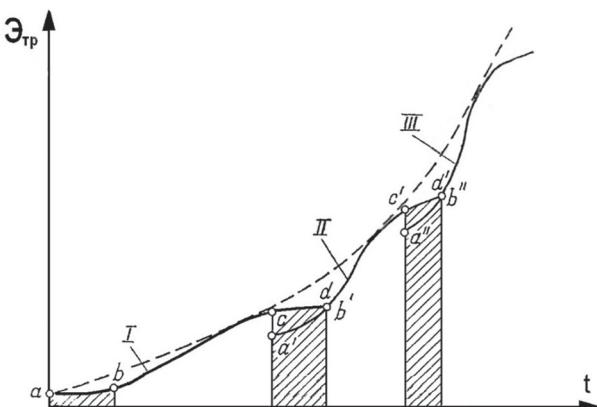


Рис. 1. Прогноз развития энергонасыщенности трактора

Первая логиста I отражает развитие трактора как тягача. Тяговая концепция характеризуется таким согласованием эксплуатационной мощности двигателя  $N_s$  и эксплуатационного веса  $G_{tp}$  трактора, при котором через силу тяги  $P_{kp}$  может быть реализована вся мощность двигателя. Этим условиям соответствует энергонасыщенность от минимальной (с начала производства тракторов) до предельной, которая получила название эталонной [4]; она равна 1,5 кВт/кН ( $\mathcal{E}_{tp} = N_s/G_{tp}$ ).

Отклонение энергонасыщенности от эталонного значения снижает эксплуатационно-технологические показатели трактора. Период *abcd*, (рис. 1) в истории тракторостроения характеризуется производством трактора первого поколения – тягача.

С начала производства тракторов – участок *ab* логисты I – по мере повышения энергонасыщенности увеличивалась номинальная скорость движения трактора. Когда  $\dot{\mathcal{E}}_{\text{тр}}$  достигла 1,5 кВт/кН, а номинальная скорость трактора 9 км/ч, правилами агротехники было установлено ограничение на дальнейшее повышение скорости, а энергонасыщенность трактора продолжала повышаться в соответствии с основной закономерностью развития техники. Нарушилось присущее трактору-тягачу строгое параметрическое соотношение между весом трактора  $G_{\text{тр}}$  и мощностью  $N_c$  двигателя. Возник «излишек» мощности, который не может быть реализован в технологическом процессе, вы полняемом МТА, из-за ограничения скорости. Трактор утрачивает присущую ему техническую концепцию тягача и приобретает новую – тягово-энергетическую концепцию.

Участки *cd* логисты I и *a'b'* логисты II характеризуют завершение тяговой и зарождение новой – тягово-энергетической концепции трактора, трактора второго поколения. Непрерывное снижение материалоемкости и чрезмерное повышение энергонасыщенности на участке логисты II стали компенсировать до уровня эталонной 1,5 кВт/кН искусственным повышением материалоемкости и снижением энергонасыщенности путем применения балластных грузов или третьего подкатного моста с активным приводом колес от ВОМ трактора. В соответствии с логистой III трактор развивается как энергетическое средство, главным образом, как источник энергии, утративший, в значительной мере, свойства тягача. Это трактор третьего поколения – энергетической концепции. Термины «тяговая концепция», «тягово-энергетическая концепция» и «энергетическая концепция», а также три поколения тракторов, соответствующих этим этапам развития, впервые были предложены в работе [2].

**Границы энергонасыщенности тракторов разной технической концепции.** Необходимость количественной оценки граничных значений энергонасыщенности между тракторами разной технической концепции обусловлена влиянием этого параметра на технологические

свойства трактора и способ агрегатирования трактора с сельскохозяйственной машиной. Граничные значения энергонасыщенности тракторов приведены с использованием результатов исследований материалоемкости и балластирования современных тракторов [3]. Обработка подверглись параметрические данные 81 трактора в диапазоне мощности двигателя  $N_c = 66...499$  кВт и массы трактора соответственно  $M_{\text{тр}} = 2910...20134$  кг.

Параметрический анализ этого массива данных тракторов, выпускаемых в настоящее время ведущими зарубежными тракторостроительными фирмами, показал (рис. 2), что половина из них, 40 штук, предусматривает балластирование грузом, вес которого достигает половины веса трактора, а еще двадцать – весом балластного груза выше половины веса трактора: девять тракторов –  $k_b = 0,59...0,63$ , девять –  $k_b = 0,65...0,71$  и 2 трактора –  $k_b = 0,8...0,83$ .

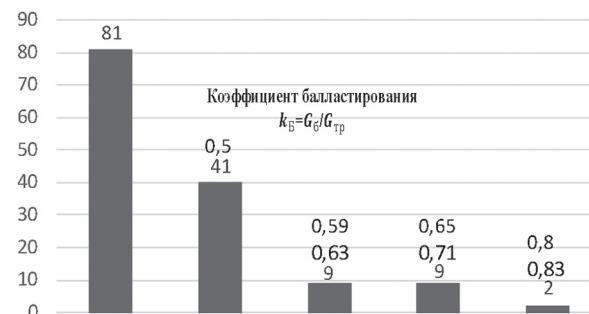


Рис. 2. Уровень балластирования современных тракторов

На основании приведенных данных граничные значения энергонасыщенности между поколениями тракторов целесообразно принять соответствующими следующим условиям:

- между I и II логистами – значение эталонной энергонасыщенности  $\dot{\mathcal{E}}_{\text{тр},\text{э}}$ , при котором возникает необходимость применения балласта или третьего подкатного моста, равной 1,5 и 1,4 кВт/кН для колесных и гусеничных, соответственно;

- между II и III логистами – значение  $\dot{\mathcal{E}}_{\text{тр}}$ , при котором применение балласта исчерпало свои возможности и дальнейшее повышение уровня балластирования технически трудно осуществимо и нерационально. Представляется целесообразным принять верхнее граничное значение  $\dot{\mathcal{E}}_{\text{тр}}$  трактора II поколения при коэффициенте балластирования  $k_b = 0,5$ . Это соответствует весу балластных грузов, равнозначному

му половине веса трактора и энергонасыщенности трактора 2,25 кВт/кН;

– верхняя граница энергонасыщенности трактора третьего поколения принята экспертом равной 4,5...5 кВт/кН, исходя из современных представлений о техническом уровне трактора будущего.

Тогда границы энергонасыщенности тракторов всех трех поколений будут следующими.

Первое поколение: верхний предел –  $\dot{\mathcal{E}}_{tp} = 1,5$  кВт/кН;

Второе поколение: нижний предел –  $\dot{\mathcal{E}}_{tp} = 1,5$  кВт/кН; верхний предел –  $\dot{\mathcal{E}}_{tp} = 2,25$  кВт/кН;

Третье поколение: нижний предел –  $\dot{\mathcal{E}}_{tp} = 2,25$  кВт/кН; верхний предел (конструктивная осуществимость) –  $\dot{\mathcal{E}}_{tp} = 4,5...5$  кВт/кН.

Анализ параметрических показателей показал, что в настоящее время характеристика выпускемых ведущими тракторостроительными фирмами тракторов по поколениям выглядит следующим образом. Из 81 трактора:

– 4 обладают  $\dot{\mathcal{E}}_{tp} \leq 1,5$  кВт/кН – первое поколение;

– 57 –  $\dot{\mathcal{E}}_{tp} = 1,5...2,25$  кВт/кН – второе поколение;

– 20 –  $\dot{\mathcal{E}}_{tp} > 2,25$  кВт/кН – третье поколение.

Таким образом, можно констатировать, что практически в рассматриваемом диапазоне прекращено производство тракторов тяговой концепции, первого поколения, и значительную часть (25 %) выпускаемых тракторов составляют тракторы третьего поколения. Закономерность изменения материалоемкости  $M_{tp}$  трактора и силы тяги  $P_{kp,n}$  в процессе повышения его технического уровня не зависит от тягового класса. В качестве объекта исследования рассмотрим колесный трактор тягового класса 3.

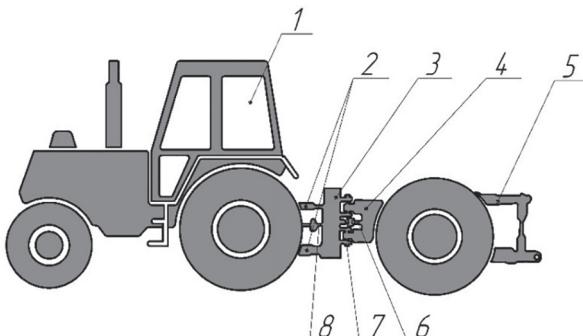
Прямых вариантов снижения материалоемкости трактора  $M_{tp}$ , не считая комбинации, два: уменьшение его эксплуатационного веса  $G_{tp}$  при сохранении эксплуатационной мощности двигателя  $N_d$ ; повышение эксплуатационной мощности двигателя при сохранении эксплуатационного веса трактора. Анализ проведем, изменения материалоемкость и энергонасыщенность трактора за счет снижения его веса, сохранив мощность двигателя неизменной. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

**Технологические свойства и способ агрегатирования тракторов второго поколения.** Как отмечено ранее, повышение энергонасыщенности выше эталонной снижает технологические

свойства трактора, потому что у тракторов тягово-энергетической концепции возникает «излишек» мощности двигателя, который не может быть использован в технологическом процессе, выполняемом МТА. Зарубежный опыт решения проблемы состоит в применении балластных грузов, т.е. в искусственном увеличении веса трактора до уровня энергонасыщенности трактора-тягача. При этом трактор сохраняет номинальную скорость на уровне, ограниченном правилами агротехники. В нашей стране был разработан способ додгрузки трактора третьим подкатным мостом (ТТМ) с приводом на его колеса от синхронного БОМ трактора (рис. 3).

**Таблица 1**  
Сравнительные показатели веса  $G_{tp}$  и силы тяги  $P_{kp,n}$  трактора первого–третьего поколений

	Первое поколение	Второе поколение	Третье поколение
$N_d$ , кВт	112	112	112
$G_{tp}$ , кН	75	50	25
$\dot{\mathcal{E}}_{tp}$ , кВт/кН	1,5	2,25	4,5
$M_{tp}$ , кН/кВт	0,67	0,45	0,22
$M_{tp}$ , %	100	67	33
$P_{kp,n}$ , кН	30	20	10
$P_{kp,n}$ , %	100	67	30



**Рис. 3. Модульное энергетическое средство МЭС-200:**

1 – энергетический модуль (ЭМ), 2 – тяги навесного устройства ЭМ; 3 – согласующий редуктор; 4 – транспортно-технологический модуль (ТТМ); 5 – навесное устройство ТТМ; 6 – вал привода колес ТТМ от согласующего редуктора; 7 – шарнирное сочленение; 8 – вал от БОМ ЭМ

Потенциальные возможности повышения технологических свойств тракторов второго поколения могут быть осуществлены в сфере эксплуатации путем маневрирования весом балластных грузов или применением ТТМ.

Таблица 2

## Сравнительный типоразмерный ряд тракторов первого и второго поколений

Типоразмерный ряд тракторов по ГОСТ 27021-86	Догрузка тракторов второго поколения балластом или ТТМ	Типоразмерный ряд тракторов второго поколения
2		
3	50 кН + 25 кН = 75 кН	2–3
4		
5	100 кН + 25 кН + 25 кН = 150 кН	4–5–6
6		
8	150 кН + 25 кН + 25 кН = 200 кН	6–7–8

Данные табл. 2 показывают, что таким образом можно сократить разномарочность в хозяйстве путем применения балластных грузов весом  $G_b = 25$  кН, соответствующим силе тяги  $P_{kp} = 10$  кН (при  $\varphi_{kp} = 0,4$ ) ( $P_{kp} = \varphi_{kp} G_b$ ).

Вместо шести тракторов первого поколения (с 2 до 8) по ГОСТ 27021-86 достаточно иметь три базовых трактора: тягового класса 2, 4 и 6 (в табл. 2, колонка III выделены полужирным шрифтом). Более того, стандартный типаж тракторов может быть уплотнен дополнительно трактором тягового класса 7 без введения в него базовой модели.

Трактор второго поколения тягового класса 2 путем догрузки балластом 25 кН может работать с системой с.-х. машин, предназначеннной для трактора тягового класса 3, а тракторы тягового класса 4 и 6 с догрузкой балластом 25 кН + 25 кН могут агрегатироваться с с.-х. машинами, предназначенными для двух смежных тяговых классов – 5 и 6, 7 и 8, соответственно. Это позволяет не только снизить разномарочность тракторов в хозяйстве, но уменьшить вредное действие движителей на почву, а также расход топлива. При комплектации тракторного парка конкретного хозяйства в качестве базовых тракторов могут выступать тракторы любого тягового класса – не обязательно 2, 4 и 6, как указано выше. В общем случае маневрирования балластом вес грузов также может отличаться от 25 кН, принимая промежуточные значения, зависящие от тяговой нагрузки. Отмеченные возможности повышения технологических свойств тракторов тягово-энергетической концепции могут быть реализованы только при условии грамотного использования балласта, что требует дополнительного технического оснащения трактора средствами измерения, позволяющими уст-

авливать нужное соотношение между тяговым сопротивлением на крюке трактора и необходимым весом балластных грузов. Способ замены балластных грузов должен быть удобным и нетрудоемким.

Способ догрузки трактора транспортно-технологическим модулем (ТТМ) разработан в 80-е годы прошлого века [5]. Комплекс, состоящий из трактора с транспортно-технологическим модулем, получил название мобильного энерготехнологического средства – МЭС, а способ соединения МЭС с сельскохозяйственной машиной – блочно-модульного агрегатирования. Испытания ведущими исследовательскими и испытательными центрами СССР (Кубанский НИИТИМ, ВИМ, НАТИ, Украинский НИИМЭСХ) энерготехнологических средств МЭС-200 и МЭС-300, созданных НАТИ, Минским и Харьковским тракторными заводами, показали их высокие технологические свойства. Липецким тракторным заводом (по чертежам МТЗ) была изготовлена опытная партия МЭС-200. На рис. 3 представлена схема модульного энерготехнологического средства МЭС-200, созданного МТЗ – НАТИ.

Сопоставляя технологические свойства двух способов догрузки трактора высокой энергонасыщенности, можно отметить следующие преимущества применения в качестве средства догрузки ТТМ:

- колесная формула 6×6 придает более высокие тяговые свойства агрегату;
- меньше осевая нагрузка и давление на почву движителей,
- большее количество колес позволяет применять шины меньшего размера при равной общей грузоподъемности ходовой системы, что особенно важно для работы трактора в междурядьях пропашных культур;

- трехосная схема обладает более высокой курсовой устойчивостью;
- вертикальные и горизонтальные колебания от орудия воспринимает ТТМ, вследствие чего снижаются динамические нагрузки на агрегаты трактора и улучшаются условия труда тракториста;
- меньшая трудоемкость и большее удобство использования ТТМ, что не требует проведения монтажно-демонтажных работ, необходимых при балластировании трактора;
- на ТТМ создается дополнительное пространство для размещения смеси с технологическим материалом или балластных грузов;
- ТТМ может быть создан в модификациях как стандартная унифицированная приставка, не конкретно к данной модели трактора, а к тракторам разного тягового класса.
- тракторы, предназначенные для догрузки ТТМ, могут оснащаться облегченной трансмиссией и ходовой системой по сравнению с балластируемыми тракторами.

В эксплуатации ТТМ можно приобретать не для каждого трактора, а один экземпляр на несколько тракторов и использовать его по мере необходимости.

Перечисленные достоинства трехосной системы МЭС по сравнению с двухосной системой трактора известны. Другие преимущества также очевидны.

Важное достоинство транспортно-технологического модуля состоит в том, что он допускает большую догрузку по сравнению с пределами рационального балластирования, и создает преемственность между тракторами второго и третьего поколения в решении проблемы их агрегатирования и технологических свойств (рис. 4, б, с).

Преимуществом балластирования по сравнению с блочно-модульной системой агрегатирования служит более низкая стоимость тонны балластного груза по сравнению с тонной ТТМ.

На рис. 4 представлены схемы агрегатирования тракторов второго и третьего поколений:

Второе поколение:

- балластирование – рис. 4, а;
- блочно-модульное агрегатирование с применением ТТМ – рис. 4, б;

Третье поколение –

- блочно-модульное агрегатирование с применением ТТМ – рис. 4, в;

- привод колес с.-х. машины от тракторного двигателя – рис. 4, с.

**Технологические свойства и способ агрегатирования тракторов третьего поколения.** Исторически процесс совершенствования технологий сельскохозяйственного производства и сельскохозяйственной техники происходит таким образом, что вес и тяговое сопротивление технологической части МТА возрастает, а вес и сила тяги трактора, предназначенного для работы с этим технологической частью, уменьшается. Соотношение веса энергетической и технологической частей МТА наглядно показано на рис. 5.

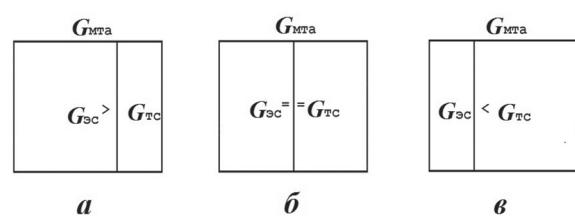
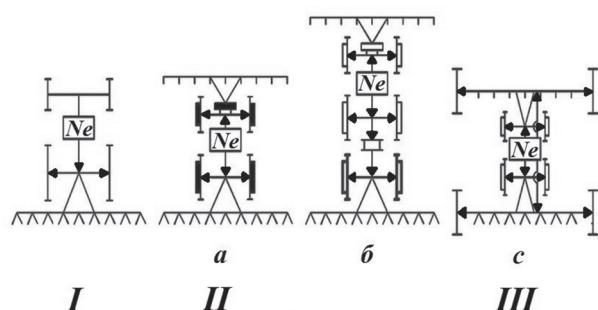


Рис. 5. Изменение соотношение массы энергетической и технологической частей МТА:

а – было; б – стало; в – прогноз

Полная площадь прямоугольника условно представляет вес машинно-тракторного агрегата  $G_{\text{ма}}$ , неизменяемый во времени («было», «стало», «прогноз»), а отдельные площади прямоугольника – вес трактора  $G_{\text{эс}}$  и технологической части  $G_{\text{тс}}$  (отдельная сельскохозяйственная машина или технологический комплекс). Как показано выше (табл. 1), тяговые свойства трактора третьего поколения могут быть понижены в три раза вследствие закономерного по-

вышения технического уровня, по сравнению с трактором первого поколения. Недостаток силы тяги трактора возникнет даже при условии, что вес и тяговое сопротивление технологической части МТА сохранится неизменным. Чтобы компенсировать возникший недостаток силы тяги до уровня трактора-тягача необходимо использовать балластные грузы, превосходящие вес трактора третьего поколения вдвое. Практически это неосуществимо. Радикальным способом решения проблемы может служить использование в качестве сцепного веса технологической части агрегата, т.е. вес агрегатируемых с трактором сельскохозяйственных машин и емкостей с технологическим материалом, а также ТТМ (рис. 5). Тогда массу трактора можно теоретически неограниченно перемещать в технологическую часть МТА без ущерба для тяговых свойств МТА.

Использование в качестве сцепного веса сельскохозяйственных комплексов и отдельных машин требует применения на них активных колес с приводом от трактора. Для этого необходимо оснащение сельскохозяйственных машин и трактора разветвленной и адаптивной трансмиссией (рис. 4, с). В соответствии с современными тенденциями создания тяговых и транспортных машин в наибольшей мере этим требованиям отвечает электрическая трансмиссия. На тяжелых карьерных автомобилях применяются только такие трансмиссии. В последние годы электротрансмиссии нашли широкое применение и на дорожных автомобилях с гибридными силовыми установками, на автобусах. Проводятся работы по созданию электротракторов. Так, фирмой Fendt создан опытный образец электротрактора Fendt e100 Vario с электродвигателем мощностью 50 кВт, который можно использовать в течение 5 часов непрерывной работы без подзарядки аккумуляторов. В качестве источника энергии применены электрические батареи «Тесла». Предполагалось, что в 2018 г. ограниченная серия тракторов Fendt e100 Vario будет использоваться на отдельных сельскохозяйственных предприятиях и в коммунальных хозяйствах стран Европы. Однако перспективу использования на сельскохозяйственных тракторах в качестве источника энергии батареи «Тесла» следует рассматривать как более отдаленную. В настоящее время доступнее создать трактор с силовой установкой, состоящей из дизель-генератора и электрической трансмиссии. Трактор

третьего поколения в виде легкого мобильного дизель-генератора способен служить также передвижным источником электрической энергии взамен стационарного. При любом уровне механизации и электрификации сельского хозяйства такой источник энергии в хозяйстве может найти применение. Полная электрификация машинно-тракторного агрегата послужит наилучшим образом глубокой автоматизации технологических операций в полеводстве и будет способствовать переводу всей отрасли механизации сельскохозяйственного производства на новый уровень развития.

Преимущества трактора третьего поколения по сравнению с тракторами первого и второго поколения можно продемонстрировать на примере работы каждого из этих тракторов в агрегате с одним и тем же современным посевным комплексом JOHN DEERE 1890 (рис. 6).



**Рис. 6. МТА с посевным комплексом  
JOHN DEERE 1890**

По техническим условиям фирмы, для работы с этим посевным комплексом необходим трактор с двигателем мощностью 300 кВт. В табл. 3 приведены показатели веса тракторов

**Таблица 3**

**Показатели материалоемкости посевного МТА  
с тракторами разной технической концепции**

	Первое поколение	Второе поколение	Третье поколение
$N_e$ , кВт	300	300	300
$\dot{\mathcal{E}}_{tp}$ , кВт/кН	1,5	2,25	5
$G_{tp}$ , кН	200	130	60
$\Delta G_{tp}$ , кН	140	70	—
$G_{MTA}$ , кН	310	240	170
$G_{MTA}$ , %	100	77	55
$G_{top/cm}$ , л	180	90	—
Осевая нагрузка трактора, кН	100	65	30

трех поколений с двигателем указанной мощности, а также вес МТА на их основе с посевным комплексом JD. Разница веса  $\Delta G_{tp}$  трактора тяговой и тягово-энергетической концепции по сравнению с трактором третьего поколения составляет 140 и 70 кН, соответственно.

Для перемещения грузов такого веса по полю в течение смены (10 ч) необходимо израсходовать (расчет) 180 и 90 л топлива, соответственно. Осевая нагрузка на почву тракторов первого и второго поколения (6,5 и 10 т) превышает осевую нагрузку трактора третьего поколения (30 т) в 2 и 3 раза и достигает значений предельно допустимой нагрузки на автомобильную дорогу – 6–11,5 т. Эти данные свидетельствуют о том, что тракторы первого и второго поколений создают чрезвычайно высокую нагрузку на почву и намного превосходят тракторы третьего поколения по показателю вредного воздействия. Вследствие применения шин большего размера тракторы первого и второго поколений вытаптывают большую площадь поля, особенно при сдавливании колес, по сравнению с трактором третьего поколения. Материалоемкость МТА на основе трактора третьего поколения на 45 % ниже материалоемкости МТА на основе трактора первого поколения.

Посевной комплекс, обладая весом 110 кН, оснащенный активными колесами, способен развивать силу тяги, равную 44 кН. Это значение выше номинального тягового усилия трактора тягового класса 4. Таким образом, при оснащении посевного комплекса JOHN DEERE 1890 активными колесами он может перемещаться по полю за счет собственной силы тяги.

## Выводы

1. Повышение энергонасыщенности, как основная закономерность развития технического уровня трактора, существенно влияет на его техническую концепцию и технологические свойства. По признаку такого влияния можно выделить три этапа развития конструкции трактора: тяговая, тягово-энергетическая и энергетическая концепции.

2. Непрерывное повышение энергонасыщенности трактора первого поколения – тяговой концепции – использовалось для увеличения рабочей скорости трактора и его технологических свойств, повышая производительность МТА. По мере повышения энергонасыщенности вес тракторов второго поколения снижается и увеличивается вес балласта, а скорость

остается неизменной, так как ограничена правилами агротехники.

3. В настоящее время практически прекращено производство тракторов тяговой концепции. Балластирование тракторов второго и третьего поколений достигло предельного уровня. У 74 % из 81 проанализированных тракторов, выпускаемых ведущими тракторостроительными фирмами, вес балластных грузов достигает 0,5...0,82 веса трактора. При этом повышение технологических свойств сохраняется по большей части лишь потенциально.

4. Применение транспортно-технологического модуля служит эффективным способом решения проблемы балластирования и повышения технологических свойств трактора второго поколения. Транспортно-технологический модуль может применяться одинаково эффективно как с тракторами второго, так и третьего поколения, придавая блочно-модульной системе агрегатирования трактору важное свойство – преемственность «тракторных поколений».

5. Конструктивное решение трактора третьего поколения энергонасыщенностью 4,5...5 кВт/кН возможно путем создания энергетического средства в виде мобильного дизель-генератора с электрической трансмиссией. Для использования потенциальных возможностей повышения технологических свойств трактора третьего поколения сельскохозяйственные машины, предназначенные для агрегатирования с ним, должны быть оснащены электрическими мотор-колесами.

6. Тракторы тягово-энергетической и энергетической концепций обладают потенциальной возможностью снижения вредного воздействия тракторных движителей на почву, расхода топлива, материалоемкости МТА, разномарочности тракторов в хозяйстве. Практическое использование этих возможностей в эксплуатации требуют оснащения трактора средствами, позволяющими автоматически измерять, а также удобно изменять уровень балластирования в зависимости от силы тягового сопротивления на крюке трактора.

## Литература

1. Кутьков Г.М., Ксеневич И.П. Технологические основы и техническая концепция трактора второго поколения. Тракторы и сельхозмашины. 1982. № 12.
2. Кутьков Г.М., Чухчин Н.Ф., Мусин А.Р. Технологические и агротехнические основы развития

- МЭС как трактора второго поколения тягово-энергетической концепции. М: ГОНТИ-НПО «НАТИ». 1983. С. 3–9.
3. Кутьков Г.М., Грибов И.В., Перевозчикова Н.В. Балластирование сельскохозяйственных тракторов. Тракторы и сельхозмашини. 2017. № 9. С. 52–60.
  4. Кутьков Г.М. Энергонасыщенность и классификация тракторов. Тракторы и сельхозмашини. 2007. № 8. С. 14–20.
  5. Кутьков Г.М. Тракторы и автомобили. Теория и технологические свойства. М.: Инфра-М, 2014. 506 с. + 10,66 ЭБС.

## References

1. Kut'kov G.M., Ksenevich I.P. Technological background and technical concept of the second genera-

tion tractor. Traktory i sel'skohozyajstvennye mashiny. 1982. No 12 (in Russ.).

2. Kut'kov G.M., CHuhchin N.F., Musin A.R. Technological and agrotechnical bases for the development of MES as a second generation tractor of traction and energy concept. Moscow: GONTI-NPO «NATI» Publ. 1983, pp. 3–9 (in Russ.).
3. Kut'kov G.M., Gribov I.V., Perevozchikova N.V. Ballasting of agricultural tractors. Traktory i sel'hozmashiny. 2017. No 9, pp. 52–60 (in Russ.).
4. Kut'kov G.M. Energy saturation and classification of tractors. Traktory i sel'hozmashiny. 2007. No 8, pp. 14–20 (in Russ.).
5. Kut'kov G.M. Traktory i avtomobili. Teoriya i tekhnologicheskie svojstva [Tractors and automobiles. Theory and technological properties]. Moscow: Infra-M Publ., 2014. 506 p.

## РАВНОВЕСИЕ РОМБОВИДНОГО ПЛУГА В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

### THE BALANCE OF THE DIAMOND-SHAPED PLOW IN THE HORIZONTAL PLANE

П.В. ЧУПИН, к.т.н.  
А.С. СОЮНОВ, к.т.н.  
А.Ю. ГОЛОВИН  
О.М. КИРАСИРОВ, к.т.н.  
Е.В. ДЕМЧУК, к.т.н.

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Омский государственный аграрный университет  
им. П.А. Столыпина», Омск, Россия, pv.chupin@omgau.org

P.V. CHUPIN, PhD in Engineering  
A.S. SOYUNOV, PhD in Engineering  
A.YU. GOLOVIN  
O.M. KIRASIROV, PhD in Engineering  
E.V. DEMCHUK, PhD in Engineering

Omsk State Agrarian University, Omsk, Russia,  
pv.chupin@omgau.org

Ромбовидный плуг, открывая борозду с наклонной стенкой, уменьшает площадь боковой опоры, что рождает проблему сохранения устойчивого хода плуга. В то же время более широкая борозда ромбовидного корпуса позволяет энергонасыщенному трактору двигаться правыми колесами по ней и благодаря этому, сместить линию тяги плуга вправо, что в свою очередь разгружает боковую опору и уменьшает тяговое сопротивление плуга. Замена полевых досок на всех корпусах общей полевой доской, установленной на последнем корпусе, изменяет место приложения уравновешивающей реакции стенки борозды и ее величину, вследствие чего изменяется и тяговое сопротивление плуга. В вертикальной плоскости проекций это соответствует смещению силы трения полевой доски по линии действия. У ромбовидного корпуса, вследствие иной формы отрезаемого пласта, точка приложения равнодействующей давления почвы на него смещается в горизонтальной плоскости ближе к носку лемеха по сравнению с обычным корпусом. Исследуемый ромбовидный плуг навешивается на трактор по двухточечной схеме с прохождением горизонтальной проекции центральной тяги через точку присоединения нижних тяг к трактору. Эта точка является мгновенным центром вращения плуга в горизонтальной плоскости. При рассмотрении схемы плуга с полевыми досками, одинаковыми на всех корпусах (производственная), будем условно представлять ее с одной полевой доской на среднем корпусе, что облегчает теоретический анализ. Неотрывное изменение во времени сил, действующих на рабочие и дополнительные органы – специфическая особенность условий работы сельскохозяйственных агрегатов. На данном основании эти усилия рассматриваются как стационарные случайные функции времени, а для изучения динамических объектов, находящихся под их воздействием, используют статистический метод, базирующийся на представлениях теории стационарных случайных процессов.

**Ключевые слова:** плуг, ромбовидный, сопротивление, тяга, колебания, опора, борозда, доска.

Diamond-shaped plow, opening the furrow with an inclined wall, reduces the area of the side support, which gives rise to the problem of maintaining a stable course of the plow. At the same time, the wider groove of the diamond-shaped case allows the energy-saturated tractor to move the right wheels on it and thereby shift the line of the plow thrust to the right, which in turn unloads the side support and reduces the traction resistance of the plow. Replacing field boards on all cases with a common field board installed on the last case changes the location of the balancing reaction of the furrow wall and its size and, as a result the plow's traction resistance also changes. In the vertical plane of the projections, this corresponds to the displacement of the friction force of the field board along the line of action. In a diamond case, due to a different shape of the cut layer, the point of application of the resultant soil pressure on it is shifted in a horizontal plane closer to the toe of the plowshare compared to a conventional case. The studied diamond-shaped plow is hung on the tractor in a two-point scheme with the passage of the horizontal projection of the central rod through the point of attachment of the lower rods to the tractor. This point is the instantaneous center of rotation of the plow in the horizontal plane. When considering the plow scheme with field boards, identical on all cases (production), we will conditionally present it with one field board on the middle case, which facilitates the theoretical analysis. The continuous change in time of the forces acting on the working and additional bodies is a specific feature of the working conditions of agricultural units. On this basis, these efforts are considered as stationary random functions of time, and for studying dynamic objects under their influence, they use a statistical method based on the concepts of the theory of stationary random processes.

**Keywords:** plow, diamond, resistance, rod, oscillations, support, furrow, board.

## Введение

При отвальной вспашке к показателям качества предъявляются более жесткие агротребования, чем к другим видам обработки почвы. Несоблюдение установленной глубины вспашки в сторону увеличения может привести к выносу неплодородного слоя почвы на поверхность поля, что приведет к уменьшению урожайности. При колебаниях плуга в горизонтальной плоскости происходит изменение ширины его захвата. По агротребованиям фактическая ширина захвата не должна отклоняться от конструктивной более, чем на 10 %. Изменение ширины захвата в сторону увеличения приводит к снижению крошению почвы, увеличению гребнистости поля, ухудшению заделки растительных остатков. Уменьшение фактической ширины захвата приводит к уменьшению производительности пахотного агрегата. Поэтому важно добиваться устойчивого движения плуга в горизонтальной плоскости.

## Цель исследований

Целью исследований является анализ факторов, влияющих на равновесие ромбовидного плуга в горизонтальной плоскости.

## Методы и средства проведения исследований

Для описания движения ромбовидного плуга как динамической системы составим упрощенную схему сил и перемещений (рис. 1). При этом примем, что линия тяги проходит через носок среднего корпуса и совпадает со следом центра масс плуга. В этой же точке ( $O$ ) приложены возмущающая сила тягового сопротивления ( $R$ ) и сила сопротивления протаскиванию плуга в борозде ( $F_n$ ) [1].

Наиболее полно динамика системы с идеальными голономными связями (то есть не нарушающимися при движении) описывается уравнениями Лагранжа второго рода [2, 3, 4]:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad (1)$$

где  $T$  – кинетическая энергия системы;  $q_i$  – обобщенная координата;  $Q_i$  – обобщенная сила.

За обобщенную координату примем угол поворота (перекоса) ( $\phi$ ) плуга в горизонтальной плоскости относительно точки прицепа ( $C$ ).

Определим величины, входящие в уравнение (1).

## Кинетическая энергия системы

$$T = \frac{mV^2}{2} + \frac{J_{\circ}\dot{\phi}^2}{2} = \frac{m}{2} \left( V_C^2 + (k+r)^2 \dot{\phi}^2 \right) + \frac{J_{\circ}\dot{\phi}^2}{2}, \quad (2)$$

где  $m$  – масса плуга;  $V_C$  – скорость точки  $C$ ;  $J$  – момент инерции плуга относительно вертикальной оси, проходящей через точку  $C$ ;  $J_{\circ}$  – центральный момент инерции плуга;  $k$  – длина навески трактора;  $r$  – геометрический параметр плуга (рис. 1).

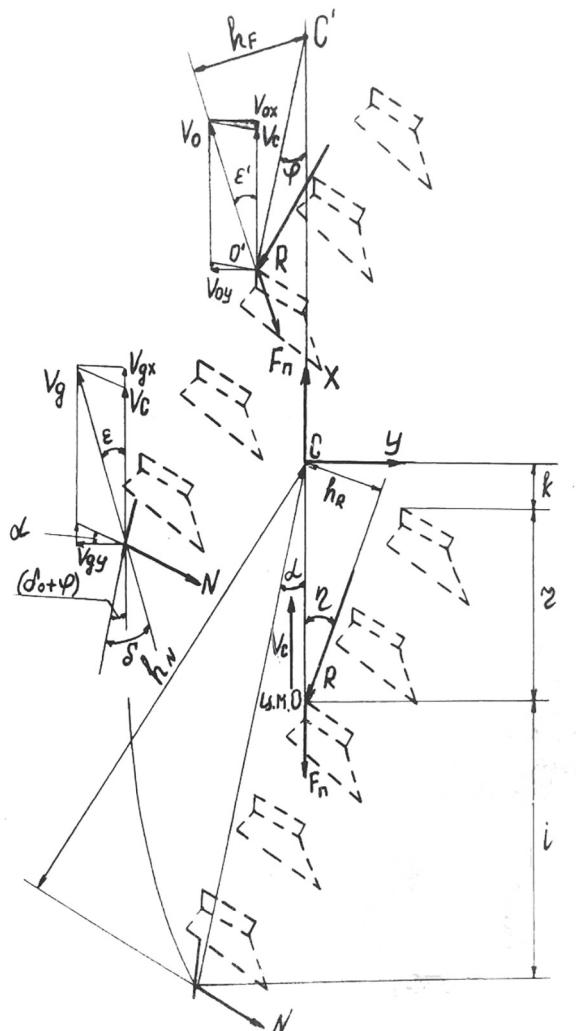


Рис. 1. Силы, действующие на ромбовидный плуг в горизонтальной плоскости

После преобразований получим

$$(m(k+r)^2 + J_{\circ}) \frac{d^2\phi}{dt^2} = Q. \quad (3)$$

Более характерным для работы плуга является его поворот по часовой стрелке. Это направление примем за положительное значение угла ( $\phi$ ) и составим уравнение элементарной работы:

$$\delta A = \delta\phi \cdot \sum M_C. \quad (4)$$

Откуда

$$Q = \sum M_C = R \cdot h_R + F_{\Pi} \cdot h_F + N \cdot h_N, \quad (5)$$

где  $h_R$ ,  $h_F$ ,  $h_N$  – плечи соответствующих сил (рис. 1). Плечи сил ( $h_R$ ) и ( $h_N$ ) при малых перемещениях почти не изменяются и могут быть определены через геометрические параметры плуга (рис. 1)

$$h_R = (k + r) \sin \eta; \\ h_N = (k + r + i) \cdot \frac{\cos(\delta_0 + \varphi_T - \alpha)}{\cos \alpha}.$$

Определим  $h_F$

$$h_F = (k + r) \cdot \sin(\varepsilon' + \varphi),$$

где  $\varepsilon'$  – угол между направлением абсолютной скорости центра масс и  $\bar{V}_C$ .

Ввиду малости углов  $\varepsilon'$  и  $\varphi$  для дальнейших расчетов примем

$$\sin \varepsilon'; \varepsilon'; \operatorname{tg} \varepsilon', \sin \varphi; \varphi; \operatorname{tg} \varphi.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= \frac{V_{\circ Y}}{V_{\circ X}}, \frac{V_{\circ Y}}{V_C}, \frac{(k + r)}{V_C} \cdot \frac{d\varphi}{dt}; \\ h_F &= (k + r) \cdot (\varepsilon' + \varphi) = \\ &= \frac{(k + r)^2}{V_C} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + (k + r) \cdot \varphi. \end{aligned} \quad (6)$$

При повороте плуга на угол  $\varphi$  изменяется величина реакции стенки борозды  $N$  за счет изменения угла  $\delta$  между направлением движения и плоскостью полевой доски.

$$\begin{aligned} N &= \frac{q \cdot d \cdot \lg \cdot h}{2 \cos(\delta + \varphi_T)} = \frac{q \cdot d \cdot \lg^2 \cdot \sin \delta}{2 \cos(\delta + \varphi_T)}; \\ \delta &= \delta_0 + \varphi + \varepsilon, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\delta_0$  – конструктивный угол установки полевой доски;  $\varepsilon$  – угол между направлением абсолютной скорости полевой доски и  $\bar{V}_C$ .

Поскольку  $\delta$  мало и  $\varphi_T$  намного превышает  $\delta$ , выражение (7) о достаточной степенью точности принимает вид:

$$N = \frac{q \cdot d \cdot \lg^2 \cdot \delta}{2 \cos(\delta + \varphi_T)} = D \cdot \delta. \quad (8)$$

Ввиду малого угла  $\varepsilon$ , можно записать

$$\varepsilon; \operatorname{tg} \varepsilon; \frac{V_{gY}}{V_{gX}}, \frac{(k + r + i)}{V_C} \cdot \frac{d\varphi}{dt}.$$

На основании этого

$$\delta = \delta_0 + \varphi + \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{k + r + i}{V_C}.$$

Тогда выражение (8) примет вид:

$$N = D \cdot \left( \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{k + r + i}{V_C} + \varphi + \delta_0 \right). \quad (9)$$

Подставим найденные выражения (6) и (9) в формулу (5)

$$\begin{aligned} Q &= \sum M_C = R \cdot h_R + F_{\Pi} \cdot \frac{(k + r)^2}{V_C} \cdot \frac{d\varphi}{dt} + \\ &+ F_{\Pi} (k + r) \varphi + D \cdot h_N \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{k + r + i}{V_C} + D \cdot h_N \cdot \varphi + \\ &+ D \cdot h_N \cdot \sin \delta_0 = \frac{F_{\Pi} (k + r)^2 + D \cdot h_N (k + r + i)}{V_C} \times \\ &\times \frac{d\varphi}{dt} + (F_{\Pi} (k + r) + D \cdot h_N) \varphi + R \cdot h_R + D \cdot h_N \cdot \sin \delta_0. \end{aligned} \quad (10)$$

Подставляя это выражение в уравнение (3) получим

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + A \frac{d\varphi}{dt} + B \varphi = M(t), \quad (11)$$

где  $J$  – коэффициент инерции плуга,

$$J = J_0 + m(k + r)^2; \quad (12)$$

$A$  – коэффициент, учитывающий сопротивление изменению положения плуга,

$$A = \frac{F_{\Pi} (k + r)^2 + D \cdot h_N (k + r + i)}{V_C}; \quad (13)$$

$B$  – коэффициент жесткости связей,

$$B = F_{\Pi} (k + r) + D \cdot h_N; \quad (14)$$

$M(t)$  – возмущающий момент,

$$M(t) = R \cdot h_R - D \cdot h_N \cdot \sin \delta_0. \quad (15)$$

Выражение (11) представляет собой уравнение вынужденных колебаний плуга с затуханием под действием составляющей силы  $R(t)$  (15).

Подставив в выражения (11)–(15) параметры производственной схемы плуга, получим уравнение его движения с учетом динамических свойств.

Для определения характера затухания колебаний плуга представим коэффициенты сопротивления, жесткости и возмущающий момент следующим образом:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2h \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2 \varphi = \frac{M(t)}{J}, \quad (16)$$

где  $h = \frac{A}{2J}$  – постоянная затухания;  $\omega_0 = \sqrt{\frac{B}{J}}$

частота собственных колебаний плуга.

Например, колебания плуга в горизонтальной плоскости зависят от отношения  $(h / \omega_0)$ , которое называется коэффициентом затухания [5, 6].

При  $h / \omega_0 < 1$  (малый коэффициент сопротивления по отношению к коэффициенту инерции) движение плуга будет иметь характер периодических затухающих колебаний с амплитудой и частотой, значения которых зависят от коэффициента инерции. При  $h / \omega_0 > 1$  (большой коэффициент сопротивления) колебательное движение плуга совершается при апериодическом затухании и в меньшей степени зависит от коэффициента инерции, а определяется, главным образом, характером функции  $R(t)$ .

Подставляя необходимые параметры плуга в выражения (12)–(14), получим для экспериментального ромбовидного плуга с  $L = 600$  мм и одной полевой доской на последнем корпусе  $h / \omega_0 = 8\dots10$ , а для производственной схемы с  $L = 800$  мм и обычными корпусами, отрезающими вертикальную стенку борозды  $h / \omega_0 = 6\dots7$  и для производственной схемы с  $L = 800$  мм и ромбовидными корпусами, оставляющими только часть стенки борозды вертикальной ( $d = 50$  мм),  $-h / \omega_0 = 3\dots4$ .

Видно, что коэффициенты затухания колебаний  $h / \omega_0 \gg 1$  как для экспериментальной, так и для производственной схем. То есть характер их колебаний определяется главным образом изменением  $R(t)$ .

Результаты экспериментов показывают, что эти колебания не приводят к отклонениям ширины захвата плуга больше допустимых требованиями.

Даже в тех опытах, где фактическая ширина захвата (средняя за опыт) отклоняется от расчетной больше, чем на 10 %, коэффициент вариации не превышает 6 %. То есть плуг шел сравнительно устойчиво, но колебания его при этом совершались не около расчетного среднего положения, а около нового равновесного состояния. Это происходит потому, что при развороте плуга плечи сил изменяются, пока не наступает новое равновесное состояние. Около него и происходят колебания под действием  $R(t)$ , которые не превышают допустимые агротребованиями. Чтобы исключить начальный

угол поворота плуга, нужно определить положение его линии тяги в зависимости от положения других сил, действующих на плуг.

Результаты экспериментальной проверки работы плуга при различных (рассматриваемых выше) вариантах агрегатирования подтверждают оптимальность выбранных теоретических вариантов агрегатирования.

Экспериментальная проверка возможности работы 5 корпусного ромбовидного плуга с межкорпусным расстоянием 600 мм и удлиненной полевой доской (500 мм) на последнем корпусе при смещении трактора в борозду подтвердила работоспособность этого плуга.

Для возможности агрегатирования 6 корпусного ромбовидного плуга с Т-150К по варианту его движения по борозде нужно линию тяги смещать не на 370 мм, а только на 270 мм [7, 8]. При этом реакция стенки борозды  $N$  и требуемая длина полевой доски  $lg$  будут такими же, как и для 5 корпусного в варианте движения трактора по борозде. А для слитности пашни между проходами навеску на тракторе необходимо сместить влево на 100 мм, что в свою очередь будет компенсировать разворачивающий трактор момент от силы  $R_y$ . Для осуществления этого варианта агрегатирования нужно иметь на тракторе конструкцию навески, позволяющую ее смещение левее оси симметрии на указанную или близкую к ней величину.

## Выводы

Подводя итог можно сделать следующие выводы.

Экспериментальный ромбовидный плуг с уменьшенным межкорпусным расстоянием и одной полевой доской на последнем корпусе имеет большое сопротивление изменению его положения в горизонтальной плоскости, и вследствие этого его колебания совершаются с апериодическим затуханием.

Смещение линии тяги вправо уменьшает боковое давление плуга  $N$  и его тяговое сопротивление  $P_x$ .

Уменьшение длины плуга (межкорпусного расстояния) приводит к более интенсивному изменению тягового сопротивления от смещения линии тяги, а вынос боковой опоры на последний корпус – к менее интенсивному.

Получены теоретические зависимости тягового сопротивления  $P_x$ , бокового давления  $N$  и длины полевой доски  $lg$  от смещения линии

тяги  $m$ , которые позволяют производить выбор оптимальных параметров и вариантов агрегатирования ромбовидного плуга.

## Литература

1. Горячkin, В.П. Собрание сочинений. 2-е изд. М.: Колос, 1968. Т. 2. 455 с.
2. Карпов, В.П. Исследование и обоснование параметров рациональной схемы многокорпусного плуга: дис. ... канд. техн. наук. М., 1969. 179 с.
3. Бледных, В.В. Исследование динамических свойств полунавесных плугов: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Челябинск, 1967. 161 с.
4. Любимов, А.И., Бледных, В.В. Динамические свойства полунавесного плуга при движении в неоднородной среде // Почвообрабатывающие машины и динамика агрегатов: науч. тр. ЧИМЭСХ. Вып. 33, 1970. С. 118–137.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1984. 831 с.
6. Чупин П.В. Обоснование схемы плуга для ромбовидной вспашки: дисс. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Челябинск, 1987. 175 с.
7. Чупин П.В., Союнов А.С., Демчук Е.В. Устойчивость хода плуга для ромбовидной вспашки и определение рациональных способов его уравновешивания // Сборник материалов Национальной научно-практической конференции «Научное и техническое обеспечение АПК, состояние и перспективы развития». 2017. С. 132–138.
8. Чупин В.П., Головин А.Ю., Демчук Е.В., Союнов А.С. Расстановка корпусов плуга // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2017. № 2 (26). С. 126–131.
2. Карпов, В.П. Issledovanie i obosnovanie parametrov racional'noj skhemy mnogokorpusnogo pluga: dis. ... kand. tekhn. nauk [Research and justification of the parameters of a rational scheme of multi-body plow: Dissertation for degree of Ph.D. in Engineering]. Moscow, 1969. 179 p.
3. Blednyh, V.V. Issledovanie dinamicheskikh svojstv polunavesnyh plugov: Dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.01 [Study of the dynamic properties of semi-mounted plows: Dissertation for degree of Ph.D. in Engineering]: Chelyabinsk, 1967. 161 p.
4. Lyubimov A.I., Blednyh V.V. Dynamic properties of a semi-mounted plow when moving in a heterogeneous environment. Pochvoobrabatyvayushchie mashiny i dinamika agregatov: nauch. tr. CHIMEH-SKH. Vyp. 33, 1970, pp. 118–137 (in Russ.).
5. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike [Handbook of mathematics]. Moscow: Nauka Publ., 1984. 831 p.
6. Chupin P.V. Obosnovanie skhemy pluga dlya rombovidnoj vspashki: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.20.01 [Justification of the plow pattern for diamond plowing: Dissertation for degree of Ph.D. in Engineering]: Chelyabinsk, 1987. 175 p.
7. Chupin P.V., Soyunov A.S., Demchuk E.V. Stability of the plow for diamond plowing and the definition of rational ways to balance it. Sbornik materialov Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii «Nauchnoe i tekhnicheskoe obespechenie APK, sostoyanie i perspektivy razvitiya» [Collection of materials of the National Scientific and Practical Conference «Scientific and technical support of the agroindustrial complex, state and development prospects»]. 2017, pp. 132–138 (in Russ.).
8. Chupin P.V., Golovin A.YU., Demchuk E.V., Soyunov A.S. Plow body placement. Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2017. No 2 (26), pp. 126–131 (in Russ.).

## References

1. Goryachkin, V.P. Sobranie sochinenij [Works collection]. 2-e izd. Moscow: Kolos Publ., 1968. Vol. 2. 455 p.

# ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЯГОВЫХ МАШИН НА СОПРОТИВЛЕНИЕ КАЧЕНИЮ

## THE INFLUENCE OF THE NUMBER OF AXLES OF WHEELED TRANSPORT TRACTION MACHINES ON ROLLING RESISTANCE

И.Н. ШИЛО<sup>1</sup>, д.т.н.

Н.Н. РОМАНЮК<sup>1</sup>, к.т.н.

А.Н. ОРДА<sup>1</sup>, д.т.н.

В.Г. КУШНИР<sup>2</sup>, д.т.н.

<sup>1</sup> Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь, romanyuk-nik@tut.by

<sup>2</sup> Костанайский государственный университет имени А. Байтурсынова, Костанай, Республика Казахстан, valkush@mail.ru

I.N. SHILO<sup>1</sup>, DSc in Engineering

N.N. ROMANYUK<sup>1</sup>, PhD in Engineering

A.N. ORDA<sup>1</sup>, DSc in Engineering

V.G. KUSHNIR<sup>2</sup>, DSc in Engineering

<sup>1</sup> Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus, romanyuk-nik@tut.by

<sup>2</sup> Kostanay State University, Kostanay, Kazakhstan, valkush@mail.ru

Процесс «деформирование – уплотнение – разуплотнение – накопление уплотнения почвы» зависит как от режимов эксплуатации техники, так и от изменяющихся свойств почвы в зависимости от ее типа, агрофона и периодов года. Поскольку основная часть потерь энергии при передвижении по полю машинно-тракторных агрегатов тратится на образование следов, то весьма важным является установление влияния числа проходов колес на изменение силы сопротивления качению. Необходимо обоснование закономерности изменения силы сопротивления качению от числа проходов колес по следу в различных почвенных условиях. Это позволит определить перспективные пути улучшения конструкций ходовых систем, в частности обосновать число осей колесных транспортно-тяговых машин. В статье показана графическая зависимость силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для сильно упрочняющейся почвы. Проанализировано влияние параметров колесной ходовой системы транспортного средства на сопротивление качению по сильно упрочняющейся почве. Определено сопротивление качению при повторных проходах колес на слабо упрочняющейся почвах. Обоснованы зависимости силы сопротивления качению колес от числа проходов по следу при различных состояниях опорной поверхности. Рассмотрены варианты сильно упрочняющейся и слабо упрочняющейся почв. Экспериментальные исследования тягово-цепных свойств многоосного колесного хода проводились на механической модели в почвенном канале. Предложенные закономерности изменения силы сопротивления качению при повторных проходах колес по следу учитывают тип и состояние почвы. Увеличение числа осей способствует снижению сопротивления качению.

**Ключевые слова:** транспортно-тяговая машина, почва, колесо, сопротивление качению, число проходов, напряжение, давление.

The process «deformation – compaction – decomposition – accumulation of soil compaction» depends both on the operating conditions of the equipment and on the changing properties of the soil depending on its type, agricultural background and periods of the year. Since the main part of energy losses during movement across the field of machine-tractor units is spent on the formation of tracks, it is very important to establish the influence of the number of wheel passes on changes in the rolling resistance force. It is necessary to substantiate the pattern of change in the rolling resistance force on the number of wheel passes on the track in various soil conditions. This will make it possible to identify promising ways to improve the design of the undercarriage systems, in particular, to justify the number of axles of wheeled transport and traction machines. The article obtained a graphical dependence of the rolling resistance force of the wheeled suspension system on the number of axles for highly hardening soil. The influence of the parameters of the vehicle's wheel drive system on rolling resistance on heavily hardened soil is analyzed. The rolling resistance at repeated passes of the wheels on weakly hardening soils is determined. The dependences of the rolling resistance force on wheels on the number of tracks on the track for various states of the bearing surface are substantiated. The variants of strongly hardening and weakly hardening soils are considered. Experimental studies of the multi-axle wheel travel traction properties were carried out on a mechanical model in the soil channel. The proposed patterns of change in the rolling resistance force during repeated wheel passes on the track take into account the type and condition of the soil. Increasing the number of axles contributes to lower rolling resistance.

**Keywords:** transport and traction machine, soil, wheel, rolling resistance, number of passes, stress, pressure.

## Введение

Воздействие ходовых систем транспортно-тяговых машин ведет к снижению урожайности сельскохозяйственных культур. Повышение плотности почвы, вызванное воздействием ходовых систем, приводит к увеличению ее твердости в 2–3 раза. Между твердостью, плотностью и удельным сопротивлением почвы при вспашке существует тесная корреляционная связь. Удельное сопротивление при обработке пахотного слоя после прохода тракторов повышается на 15–65 %, а транспортных средств и комбайнов – на 60–90 % [1, 2].

Происходящий в результате воздействия ходовых систем транспортно-тяговых машин на почву процесс «деформирование – уплотнение – разуплотнение – накопление уплотнения почвы» зависит как от режимов эксплуатации техники, так и от изменяющихся свойств почвы в зависимости от ее типа, агрофона и периодов года. Деформация почвы колесами сопровождается расходом энергии на преодоление возникающей силы сопротивления качению. Поскольку основная часть потерь энергии при передвижении по полю машинно-тракторных агрегатов тратится на образование следов, то весьма важным является установление влияния числа проходов колес на изменение силы сопротивления качению.

## Цель исследования

Целью исследования является обоснование закономерности изменения силы сопротивления качению от числа проходов колес по следу в различных почвенных условиях. Это позволит определить перспективные пути улучшения конструкций ходовых систем, в частности обосновать число осей колесных транспортно-тяговых машин.

## Материалы и методы

В теории транспортно-тяговых машин для оценки затрат энергии на деформацию почв и грунтов используют термин «коэффициент сопротивления качению», представляющий собой отношение силы сопротивления качению к весу машины [3].

При передвижении ходовых систем по почве сопротивление качению обусловливается, в основном, потерями энергии на деформацию почвы.

Работа вертикальной деформации почвы при  $i$ -м проходе колеса равна:

$$W_{\sigma_i} = A \int_{h_{i-1}}^{h_i} \sigma_i(h) dh,$$

где  $A$  – площадь пятна контакта колеса с почвой,  $\text{м}^2$ ;  $h_{i-1}$  – глубина следа при  $(i-1)$ -м проходе колеса,  $\text{м}$ ;  $h_i$  – глубина следа при  $i$ -м проходе колеса,  $\text{м}$ ;  $\sigma_i(h)$  – зависимость между напряжением и осадкой при  $i$ -м проходе колеса,  $\text{м}$ .

Суммарная величина работы после  $n$  нагружений

$$W_{\sigma} = A \sum_{i=1}^n \int_{h_{i-1}}^{h_i} \sigma_i(h) dh.$$

Значения работы при  $i$ -м проходе колеса за один оборот и после  $n$  проходов будут равны соответственно:

$$W_{\sigma_i} = 2\pi \cdot r \cdot B_k \int_{h_{i-1}}^{h_i} \sigma_i(h) dh, \quad (1)$$

$$W_{\sigma_n} = 2\pi \cdot r \cdot B_k \cdot \sum_{i=1}^n \int_{h_{i-1}}^{h_i} \sigma_i(h) dh, \quad (2)$$

где  $r$  – радиус колеса,  $\text{м}$ ;  $B_k$  – ширина контакта колеса с почвой,  $\text{м}$ .

С другой стороны, работа сил сопротивления качению равно

$$W = 2\pi \cdot r \cdot F_f, \quad (3)$$

где  $F_f$  – сила сопротивления качению колесного хода,  $\text{Н}$ .

Приравняв правые части уравнений (1) и (3), находим значение силы сопротивления качению при  $i$ -м проходе колеса

$$F_{f_i} = B_k \cdot \int_{h_{i-1}}^{h_i} \sigma_i(h) dh. \quad (4)$$

Аналогично из уравнений (2) и (3) находим суммарную силу сопротивления качению  $n$ -осного колесного хода

$$F_{f_n} = B_k \cdot \sum_{i=1}^n \int_{h_{i-1}}^{h_i} \sigma_i(h) dh. \quad (5)$$

## Результаты и их обсуждение

Для сильно упрочняющихся почв суммарную силу сопротивления качению  $n$ -осного хода найдем исходя из того, что функция  $\sigma(h)$  для сильно упрочняющихся почв является непрерывной. Поэтому к уравнению (5) можно применить свойство аддитивности интеграла [4]

$$F_{f_n} = B_k \cdot \int_0^{h_n} \sigma(h) dh.$$

Зависимость между сопротивлением и осадкой почвы подчиняется функции гиперболического тангенса [5]:

$$\sigma = p_0 \cdot \operatorname{th} \left( \frac{k}{p_0} \cdot h \right), \quad (6)$$

где  $p_0$  – предел несущей способности почвы, Па;  $k$  – коэффициент объемного смятия почвы, Н/м<sup>3</sup>.

С учетом зависимости (6) формула силы сопротивления качению примет вид:

$$F_{f_n} = B_k \cdot \int_0^{h_n} p_0 \cdot \operatorname{th} \left( \frac{k}{p_0} \cdot h \right) dh.$$

Значение этого интеграла

$$F_{f_n} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \left| \ln \operatorname{ch} \left( \frac{k}{p_0} \cdot h \right) \right|_0^{h_n}.$$

Значение  $h_n$  определяется по формуле [6]:

$$h_n = \frac{p_0}{k} \cdot \operatorname{Arch} \left( \frac{n^B}{\sqrt{1 - \sigma^2 / p_0^2}} \right), \quad (7)$$

где  $B$  – коэффициент накопления повторных осадок сильно упрочняющейся почвы.

Подставив вместо верхнего предела интегрирования  $h_n$  его значение, определяемое формулой (7), с учетом того, что контактное напряжение  $\sigma_1$  равно давлению колеса на почву  $q$ , получим

$$F_{f_n} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \cdot \ln \operatorname{ch} \left( \operatorname{Arch} \frac{n^B}{\sqrt{1 - q^2 / p_0^2}} \right)$$

или

$$F_{f_n} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \cdot \ln \frac{n^B}{\sqrt{1 - q^2 / p_0^2}}. \quad (8)$$

При первом нагружении ( $n = 1$ )

$$F_{f_1} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{1 - q^2 / p_0^2}}.$$

На основании формулы (8) получена графическая зависимость силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для сильно упрочняющейся почвы (рис. 1). Значения параметров колес и свойств почвы были равны:  $B_k = 0,3$  м;  $k = 2800$  кН/м<sup>3</sup>;  $B = 0,01$ ,  $p_0 = 500$  кПа.

Из рис. 1 видно, что сила сопротивления качению в основном формируется при первом проходе колеса. При каждом последующем проходе колеса по следу приращение силы сопротивления качению снижается.

Проанализируем, как влияют параметры колесной ходовой системы транспортного средства на сопротивление качению по сильно упрочняющейся почве.

В случае изменения давления в зависимости, обратно пропорциональной количеству осей системы, формула (8) примет вид:

$$P_{fn} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \cdot \ln \frac{N^B}{\sqrt{1 - (\xi \cdot F / A_k \cdot N \cdot p_0)^2}},$$

где  $\xi$  – коэффициент распределения давлений под опорной поверхностью колеса;  $F$  – нагрузка на ходовую систему, Н;  $A_k$  – площадь опорной поверхности колеса, м<sup>2</sup>;  $N$  – число осей ходовой системы, шт.

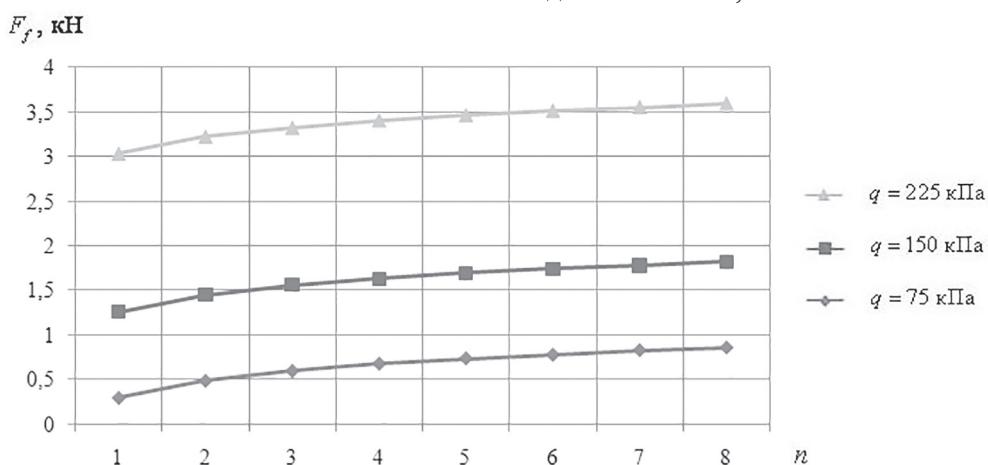
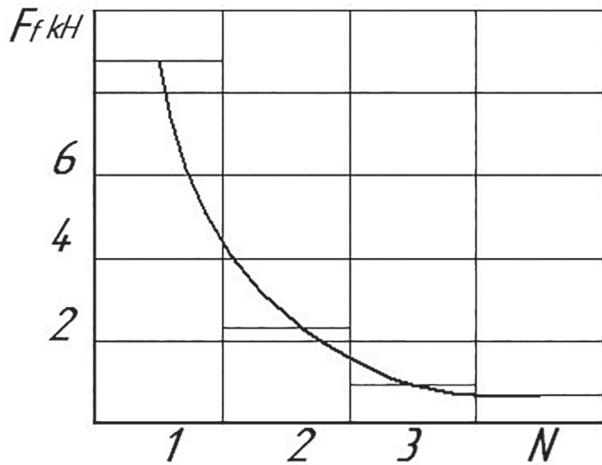


Рис. 1. Зависимость силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для сильно упрочняющейся почвы

Из рис. 2, построенного на основании данной зависимости, видно, что при сохранении общей постоянной нагрузки на ходовую систему увеличение числа осей способствует снижению силы сопротивления качению.



**Рис. 2. Влияние числа осей на сопротивление качению при постоянной общей нагрузке для сильно упрочняющейся почвы**

Найдем сопротивление качению при повторных проходах колес на слабо упрочняющихся почвах. Для этого воспользуемся зависимостью суммарной силы сопротивления качению  $n$ -осного колесного хода (5) и зависимостями напряжений от деформаций почвы.

Зависимость между напряжением и осадкой при  $n$ -м нагружении слабо упрочняющейся почвы имеет вид [6]:

$$\sigma_n = p_0 \cdot \operatorname{th} \left( \frac{k}{p_0} \cdot \frac{1}{k_u \cdot \lg(n/(n-1))} \cdot \Delta h_n \right), \quad (9)$$

где  $k_u$  – коэффициент интенсивности накопления повторных осадок для слабоупрочняющейся почвы;  $\Delta h_n$  – приращение осадки при  $n$ -м нагружении, м.

В результате преобразований зависимостей (5), (6) и (9) получим

$$F_{f_n} = B_k \left[ \int_0^h p_0 \cdot \operatorname{th} \left( \frac{k}{p_0} \cdot h \right) dh + \int_0^{h_2 - h_1} p_0 \cdot \operatorname{th} \left( \frac{k}{p_0} \cdot \frac{h}{k_u \cdot \lg 2} \right) dh + \dots + \int_0^{h_n - h_{n-1}} p_0 \cdot \operatorname{th} \left( \frac{k}{p_0} \cdot \frac{h}{k_u \cdot \lg(n/(n-1))} \right) dh \right].$$

Проинтегрировав это выражение, получим

$$F_{f_n} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \left[ \ln \operatorname{ch} \left( \frac{k}{p_0} \cdot h_1 \right) + k_u \cdot \lg 2 \times \ln \operatorname{ch} \left( \frac{k}{p_0} \cdot \frac{h_2 - h_1}{k_u \cdot \lg 2} \right) + \dots + k_u \cdot \lg \frac{n}{n-1} \times \ln \operatorname{ch} \left( \frac{k}{p_0} \cdot \frac{h_n - h_{n-1}}{k_u \cdot \lg(n/(n-1))} \right) \right]$$

или

$$F_{f_n} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \left[ \ln \operatorname{ch} \left( \frac{k}{p_0} \cdot h_1 \right) + k_u \times \sum_{i=2}^n \lg \frac{i}{i-1} \cdot \ln \operatorname{ch} \left( \frac{k}{p_0} \cdot \frac{h_i - h_{i-1}}{k_u \cdot \lg(i/(i-1))} \right) \right]. \quad (10)$$

Найдем зависимость  $F_f$  в функции давления  $q = \sigma_1$ . Представим зависимость (6) в виде:

$$\frac{k}{p_0} \cdot h_1 = \operatorname{Arth} \frac{q}{p_0}.$$

Известно, что

$$\operatorname{Arth} \frac{q}{p_0} = \operatorname{Arch} \frac{1}{\sqrt{1-q^2/p_0^2}}.$$

Тогда

$$\frac{k}{p_0} \cdot h_1 = \operatorname{Arch} \frac{1}{\sqrt{1-q^2/p_0^2}}. \quad (11)$$

Приращение осадки при  $n$ -м приложении нагрузки ( $h_n - h_{n-1}$ ) определяется по формуле [7]:

$$\Delta h_n = k_u \cdot \lg \frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_0}{k} \cdot \operatorname{Arth} \left( \frac{\sigma_1}{p_0} \right). \quad (12)$$

Подставив в зависимость (10) вместо  $(k/p_0)h_1$  его значение (11) и вместо разности  $(h_i - h_{i-1})$  – выражение (12), получим:

$$F_{f_n} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \left[ \operatorname{Arch} \left( \frac{1}{\sqrt{1-q^2/p_0^2}} \right) + k_u \cdot \sum_{i=2}^n \lg \frac{i}{i-1} \cdot \ln \operatorname{ch} \left( \operatorname{Arth} \frac{q}{p_0} \right) \right] = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \times \left( \ln \frac{1}{\sqrt{1-q^2/p_0^2}} + k_u \cdot \sum_{i=2}^n \lg \frac{i}{i-1} \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{1-q^2/p_0^2}} \right).$$

После преобразований получим

$$F_{fn} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{1 - q^2/p_0^2}} \cdot (1 + k_u \cdot \lg n). \quad (13)$$

На основании формулы (13) построим график зависимости силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для слабо упрочняющейся почвы (рис. 3).

Значения параметров колес и свойств почвы были равны:  $B_k = 0,3$  м;  $k = 1000$  кН/м<sup>3</sup>;  $k_u = 1$ ,  $p_0 = 350$  кПа.

Из рис. 3 видно, что при давлении колес на почву  $q = 75$  кПа прирост силы сопротивления качению незначительный. При более высоких давлениях интенсивность приращения силы сопротивления качению при последующих проходах колес возрастает.

В случае изменения давления в зависимости, обратно пропорциональной числу осей хо-

довой системы, на слабо упрочняющейся почве зависимость (13) примет вид:

$$F_{fn} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{1 - (\xi \cdot F / A_k \cdot N \cdot p_0)^2}} \times (1 + k_u \cdot \lg n).$$

Из рис. 4, построенного на основании данной зависимости, видно, что при увеличении числа осей глубина следа снижается. При этом интенсивность снижения глубины следа по сравнению с сильно упрочняющимися почвами уменьшается.

Экспериментальные исследования тягово-цепепных свойств многоосного колесного хода проводились на механической модели в почвенном канале. Применялись шины 5.00-10.00 несущих колес с неразвитыми почвозацепами (рис. 5).

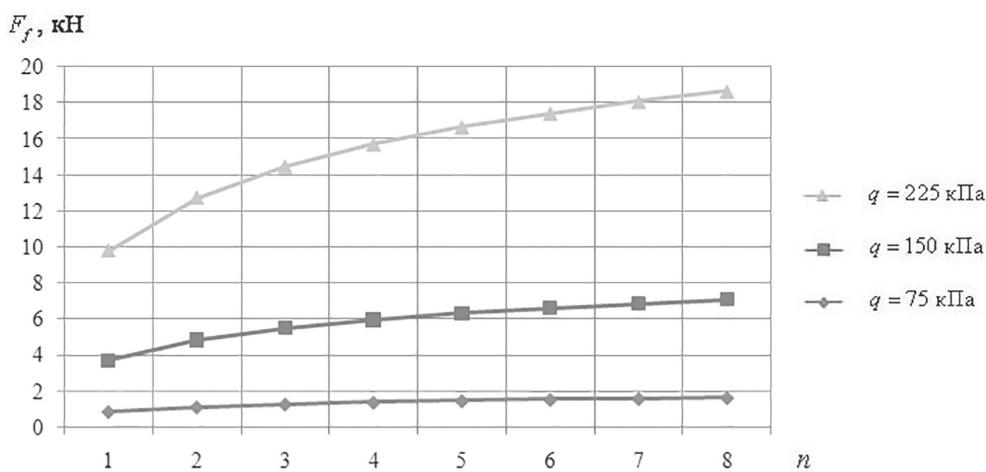


Рис. 3. Зависимость силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для слабо упрочняющейся почвы

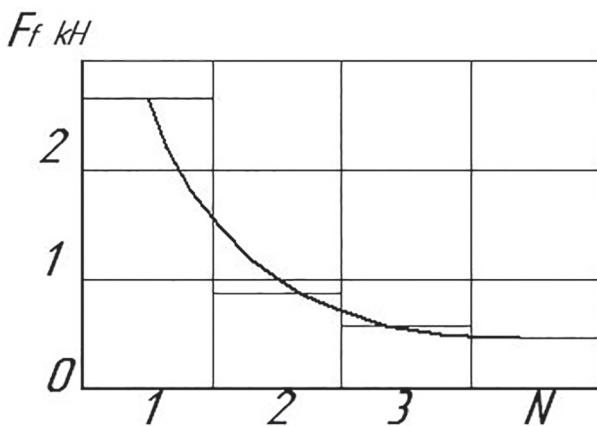


Рис. 4. Влияние числа осей на сопротивление качению при постоянной общей нагрузке для слабо упрочняющейся почвы

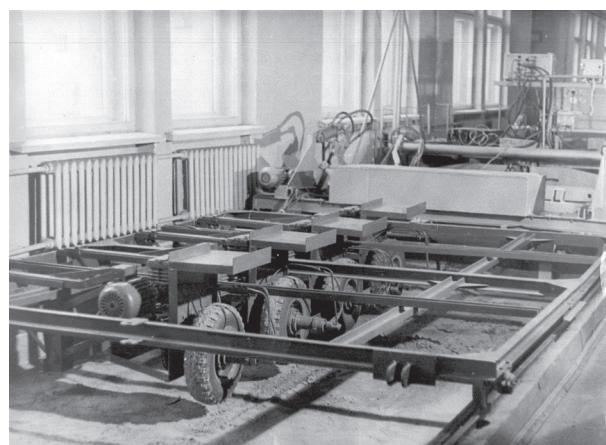
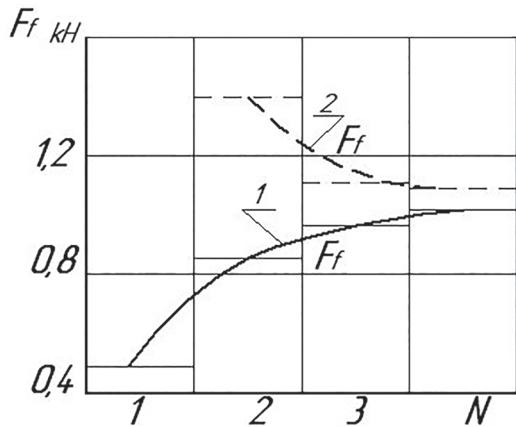


Рис. 5. Общий вид модели многоосного колесного хода с тележкой почвенного канала

Из рис. 6 видно, что основная часть силы сопротивления качению приходится на первое колесо. Увеличение числа осей при сохранении постоянной нагрузки (давление колес на почву изменяется в обратно пропорциональной зависимости от числа осей) сопротивление качению снижается. Нагрузка на ходовую систему равнялась 5,2 кН.



**Рис. 6. Влияние числа осей на сопротивление качению модели многоосного колесного хода:**

- 1 ——— — давление колес на почву одинаковое;  
2 - - - - давление изменяется в обратно пропорциональной зависимости от числа осей

## Выводы

Предложенные закономерности изменения силы сопротивления качению при повторных проходах колес по следу учитывают тип и состояние почвы. Для сильно упрочняющихся почв наибольшая энергия на передвижение расходуется при первом проходе колеса. Для слабо упрочняющихся почв при давлении колес на почву свыше 150 кПа происходит интенсивный прирост силы сопротивления качению при последующих проходах колес по следу. Для обоих типов почв при сохранении постоянной общей нагрузки на ходовую систему увеличение числа осей способствует снижению сопротивления качению.

## Литература

- Шило И.Н., Романюк Н.Н., Орда А.Н., Шкляревич В.А., Воробей А.С. Закономерности уплотнения почвы под воздействием колес сельскохозяйственных машин // Агропанорама. 2016. № 2. С. 2–8.
- Романюк Н.Н. Снижение уплотняющего воздействия на почву вертикальными вибродинамическими нагрузками пневмоколесных двигателей: дис. .... канд. техн. наук. Минск, 2008. 206 с.
- Парфенов А.П., Щетинин Ю.С. Об унификации некоторых терминов и понятий, применяемых при изучении наземных транспортно-технологических средств // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 1. С. 40–45.
- Шило И.Н., Орда А.Н., Романюк Н.Н., Нукешев С.О., Кушнир В.Г. Влияние количества осей ходовых систем мобильной сельскохозяйственной техники на глубину следа // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 4. С. 37–42.
- Кацыгин В.В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий // Вопросы сельскохозяйственной механики. Минск: Ураджай, 1964. Т. 13. С. 5–147.
- Шило И.Н., Романюк Н.Н., Орда А.Н., Шкляревич В.А., Воробей А.С. Закономерности накопления повторных осадок почвы при воздействии ходовых систем мобильной сельскохозяйственной техники // Агропанорама. 2014. № 6. С. 2–7.
- Орда А.Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.03. Минск, 1997. 269 с.

## References

- SHilo I.N., Romanyuk N.N., Orda A.N., SHklyarevich V.A., Vorobej A.S. Patterns of soil compaction under the influence of agricultural machinery wheels. Agropanorama. 2016. No 2, pp. 2–8 (in Russ.).
- Romanyuk N.N. Snizhenie uplotnyayushchego vozdejstviya na pochvu vertikal'nymi vibrodinamicheskimi nagruzkami pnevmokolesnyh dvizhitelej: dis.... kand. tekhn. nauk [Reducing the compaction effect on the soil by the vertical vibrodynamic loads of pneumatic wheel propulsion: Dissertation for degree of Ph.D. in Engineering]. Minsk, 2008. 206 p.
- Parfenov A.P., SHCHetinin Y.U.S. Unification of some terms and concepts used in the study of land transport and technological means. Traktory i sel'hozmashiny. 2018. No 1, pp. 40–45 (in Russ.).
- SHilo I.N., Orda A.N., Romanyuk N.N., Nukeshev S.O., Kushnir V.G. The effect of the number of axles of the undercarriage systems of mobile agricultural machinery on the depth of the track. Traktory i sel'hozmashiny. 2016. No 4, pp. 37–42 (in Russ.).
- Kacygin V.V. Fundamentals of the theory of choosing the optimal parameters of mobile agricultural machines and tools. Voprosy sel'skohozyajstvennoj mekhaniki. Minsk: Uradzhaj Publ., 1964. Vol. 13, pp. 5–147 (in Russ.).
- SHilo I.N., Romanyuk N.N., Orda A.N., SHklyarevich V.A., Vorobej A.S. Regularities of accumulation of repeated sediments of soil under the influence of running systems of mobile agricultural equipment. Agropanorama. 2014. No 6, pp. 2–7 (in Russ.).
- Orda A.N. EHkologo-ehnergeticheskie osnovy formirovaniya mashinno-traktornyh agregatov: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.20.03 [Ecological and energy bases of the formation of machine-tractor units: Dissertation for degree of Dr.Eng.]. Minsk, 1997. 269 p.

# ДОРОЖНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

## ROAD TESTS OF AN ELECTROMECHANICAL WHEEL TRACTOR MOTION CONTROL SYSTEMCTOR

В.И. ПОДДУБНЫЙ, д.т.н.  
А.С. НЕНАЙДЕНКО  
Р.Р. БАЙБАСАРОВ

Алтайский государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия, poddubny@list.ru

V.I. PODDUBNY, DSc in Engineering  
A.S. NENAYDENKO  
R.R. BAYBASAROV

Altai State Technical University, Barnaul, Russia,  
poddubny@list.ru

Одним из наиболее эффективных способов повышения производительности труда при выполнении сельскохозяйственных работ является внедрение систем точного земледелия. Важнейшим элементом таких систем являются подруливающие устройства и системы автопилотирования. В АлтГТУ им И.И. Ползунова проводятся исследования, целью которых является разработка системы управления движением для колесных сельскохозяйственных машин с использованием спутниковых радионавигационных систем. Одним из наиболее важных этапов при этом является апробация данной системы в реальных дорожных условиях. На начальных этапах исследований была разработана структура программно-аппаратных средств электромеханической системы управления и проведены ее лабораторные испытания в режиме реального времени. В состав системы управления входят: бесколлекторный двигатель с блоком управления, устройство ЦАП/АЦП, навигационный приемник, датчик угла поворота управляемых колес и ПК с управляющей программой. Дорожные испытания системы управления были проведены на тракторе МТЗ-1221.2. Предварительно с помощью спутникового радионавигационного приемника ГЛОНАСС/GPS была записана требуемая траектория движения. Затем осуществлялось движение по задаваемой траектории с использованием разработанной электромеханической системы управления. Дорожные испытания подтвердили достаточно хорошую работоспособность разработанной системы. При движении по прямолинейной траектории со средней скоростью 1,5 м/с максимальная ошибка составила 0,23 м, среднее квадратичное отклонение – 0,09 м. При движении по криволинейной траектории со средней скоростью 1,3 м/с максимальная ошибка составила 0,61 м, среднее квадратичное отклонение – 0,27 м. В перспективе предполагается апробация разработанной электромеханической системы в реальных рабочих условиях при проведении полевых работ.

**Ключевые слова:** точное земледелие, электромеханическая система управления движением, колесная машина, дорожный эксперимент, спутниковые радионавигационные системы, трактор МТЗ-1221.2.

Precision farming systems implementation is one of the most efficient ways to increase labour productivity in agriculture. Key elements of such systems include auxiliary thrust devices and auto-piloting systems. Altai State Technical University specialists conduct researches to develop vehicle wheelbase motion control systems for farm vehicles featuring satellite radio navigation systems. One of the most important parts of those research projects takes place during system testing in real road conditions. At the initial stages of the research, the structure of the firmware of the electromechanical control system was developed and its laboratory testing was carried out in real time mode. The control system consists of: brushless motor with a control unit, DAC/ADC device, navigation receiver, steering angle sensor and PC with a control program. On-road test of the control system were on the tractor MTZ-1221.2. Required trajectories had been set up before the experiment with a radio navigation receiver GLONASS/GPS. After that, the vehicle was directed along the trajectories with an electromechanical control system. On-road tests have confirmed a reasonably good efficiency of the developed system. On a rectilinear trajectory, at an average speed of 1,5 m/s maximum error made 0,23 m, standard deviation made 0,09 m. On a curved trajectory, at an average speed of 1,3 m/s maximum error made 0,61 m, standard deviation made 0,27 m. In future it is planned testing of the developed electromechanical system under actual operating conditions during the field work.

**Keywords:** precision farming, electromechanical motion control system, wheeled machinery, on-road experiment, satellite radio navigation systems, tractor MTZ-1221.2.

## Введение

Одним из наиболее эффективных способов повышения производительности труда при выполнении сельскохозяйственных работ является внедрение систем точного земледелия, неотъемлемой частью которых являются системы параллельного и автоматического вождения. Данные устройства получили широкое распространение в Америке, Канаде, странах Западной Европы и с недавних пор активно внедряются на территории Российской Федерации. Применение систем точного земледелия позволяет существенно повысить экономическую эффективность использования сельскохозяйственных машин, что отмечается в множестве публикаций [1–4]. Однако следует отметить отсутствие на отечественном рынке систем подруливания и автопилотирования российского производства.

В АлтГТУ им. И.И. Ползунова проводятся экспериментальные исследования, целью которых являются разработка и создание отечественной системы параллельного вождения для управления движением колесных сельскохозяйственных машин с использованием спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС/GPS и ее последующие апробация и внедрение в хозяйства региона. При этом очень важным является проведение дорожных и полевых испытаний на тракторе с целью выявления возможных конструктивных и программных недоработок.

## Цель исследования

Целью данной работы является проведение дорожных испытаний на тракторе МТЗ-1221.2 электромеханической системы управления движением колесной машины, разработанной и опробованной ранее в лабораторных условиях, проверка работоспособности системы в реальных условиях, выявление возможных конструктивных и программных недоработок.

## Материалы и методы исследования

Для достижения поставленной цели необходимо адаптировать элементы электромеханической системы для трактора МТЗ-1221.2, провести экспериментальные исследования управляемого движения трактора по задаваемой траектории с использованием разработанной системы управления, провести анализ результатов эксперимента, оценить работоспособность системы управления и сделать соответствующие выводы.

## Структура электромеханической системы управления

При создании электромеханической системы управления были использованы следующие аппаратные средства (рис. 1):

- GNSS-приемник RTK Emlid Reach с возможностью работы в режиме RTK;
- бесколлекторный электродвигатель FL86BLS98 с блоком управления BLSD-50;
- двухканальный цифро-аналоговый (ЦАП) и аналого-цифровой (АЦП) преобразователи, интегрированные в одном физическом устройстве L-Card E14-140M;
- потенциометрический датчик угла поворота колес МУ-615;
- преобразователь напряжения для питания от электрической сети колесной машины;
- ПК с операционной системой семейства Windows и набором библиотек .NET Framework 4.0 или выше.

Для удобства использования блок управления двигателем, устройство ЦАП/АЦП и преобразователь напряжения были интегрированы в один корпус (на рис. 1 – блок управления устройствами).

Кроме указанных выше устройств использовал сервис виртуальных базовых станций SmartNet для доступа к корректирующей информации с целью высокоточного определения текущего местоположения и скорости движения колесной машины. При этом доступ к сервису осуществлялся с ПК посредством интернет-соединения через USB-модем, в свою очередь поправки с ПК на GNSS-приемник передавались по Wi-Fi соединению.

Последовательность функционирования системы управления выглядит следующим образом. В управляющей программе задается траектория движения колесной машины. После начала движения система непрерывно с заданной частотой выполняет следующие действия:

- GNSS-приемник на основе корректирующей информации с базовой станции и собственных измерений вычисляет текущие координаты местонахождения колесной машины и проекции скоростей движения на неподвижные координатные оси;
- с датчика угла поворота колес считывается напряжение, соответствующее определенному углу;
- с управляющего блока электродвигателя считаются сигналы с датчиков Холла;

- напряжение с датчика угла поворота колес и сигналы с датчиков Холла поступают на АЦП, а оттуда передаются в управляющую программу на ПК;
- на основании полученных данных управляющая программа рассчитывает текущий угол поворота управляемых колес, направление вращения электродвигателя, вычисляет отклонение колесной машины от заданной траектории движения и определяет необходимый угол поворота колес, который требуется реализовать, чтобы обеспечить движение по необходимой траектории;
- исходя из величины требуемого угла поворота колес, на основании модернизированного алгоритма ПИД-регулирования определяются величина управляющего напряжения и необходимое направление вращения электродвигателя;
- эти значения передаются через ЦАП на блок управления двигателем, а оттуда для реализации – на сам электродвигатель.

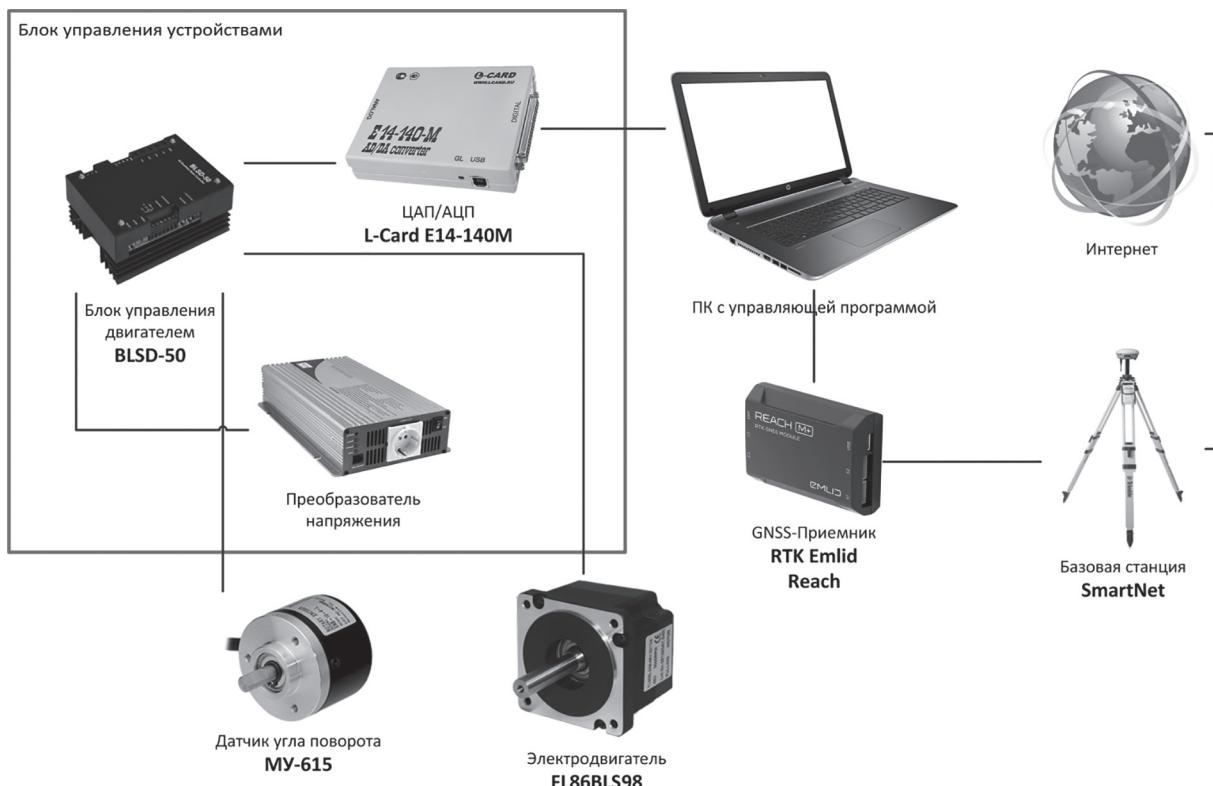
### **Дорожные испытания**

Ранее разрабатываемая система управления прошла ряд успешных испытаний на экспериментальном стенде с использованием математического моделирования управляемого движения в режиме реального времени [5].

Во время моделирования реальная колесная машина заменялась ее математической моделью, полученной с использованием дифференциальных уравнений плоского движения [6], реально существовали только передняя подвеска и рулевой механизм автомобиля. В дальнейшем были проведены дорожные испытания на тракторе МТЗ-80.1 [7], в результате которых была установлена достаточно хорошая работоспособность системы управления при прямолинейной задаваемой траектории движения, но вследствие тугого рулевого управления и значительных люфтов рулевого колеса система не смогла обеспечить качественное движение по криволинейной траектории.

Дальнейшие испытания были продолжены на современном тракторе МТЗ-1221.2 с более легким рулевым управлением. Для этого был сконструирован новый кронштейн для крепления электродвигателя к рулевому колесу, а также модернизировано крепление датчика угла поворота колес для конкретной модели трактора.

Дорожный эксперимент проходил на базе учебно-опытной сельскохозяйственной станции Алтайского государственного аграрного университета. На рис. 2–4 представлен комплект используемого на эксперименте оборудования.



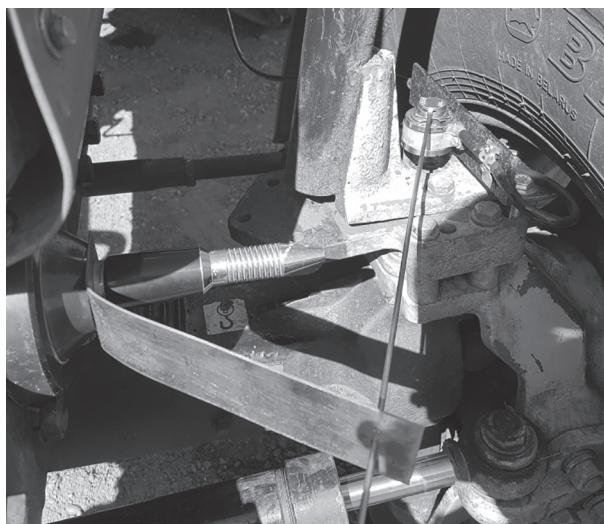
**Рис. 1. Схема взаимодействия аппаратных частей системы управления**



**Рис. 2. Крепление управляющего электродвигателя к рулевому колесу**



**Рис. 3. Блок управления устройствами**



**Рис. 4. Крепление датчика угла поворота управляемых колес**

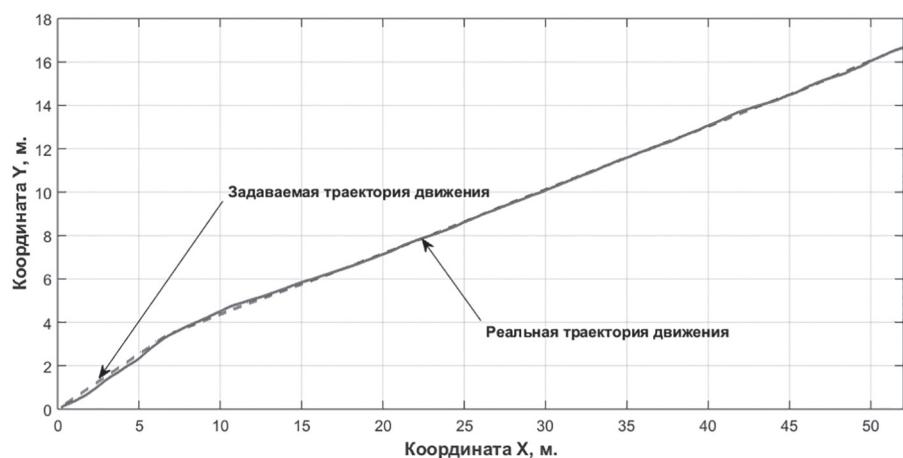
Эксперимент проводился в следующей последовательности. Сначала водителю трактора предлагалось проехать по произвольной траектории. В это время происходила запись ко-

ординат траектории движения, формировался список базовых точек задаваемой траектории. Затем трактор возвращался в начальное положение, и задаваемая траектория должна была быть реализована с использованием разработанной электромеханической системы управления без вмешательства водителя в процесс управления.

### Результаты испытаний

Во время эксперимента осуществлялось управляемое движение по различным задаваемым траекториям. На рис. 5 представлены задаваемая и реализованная траектории при прямолинейной движении со средней скоростью трактора  $V_{\text{сред}} = 1,5 \text{ м/с}$ , временем прогноза  $t_{\text{прогноза}} = 1 \text{ с}$  и коэффициентом усиления  $k_{\text{усиления}} = 0,5$ . На рис. 6 приведены графики требуемого и действительного углов поворота управляемых колес при данном движении.

Максимальная ошибка в данном эксперименте составила  $E_{\max} = 0,23 \text{ м}$ , среднее квадратичное отклонение –  $\sigma = 0,09 \text{ м}$ .



**Рис. 5. Задаваемая и реализованная траектории при прямолинейном движении**

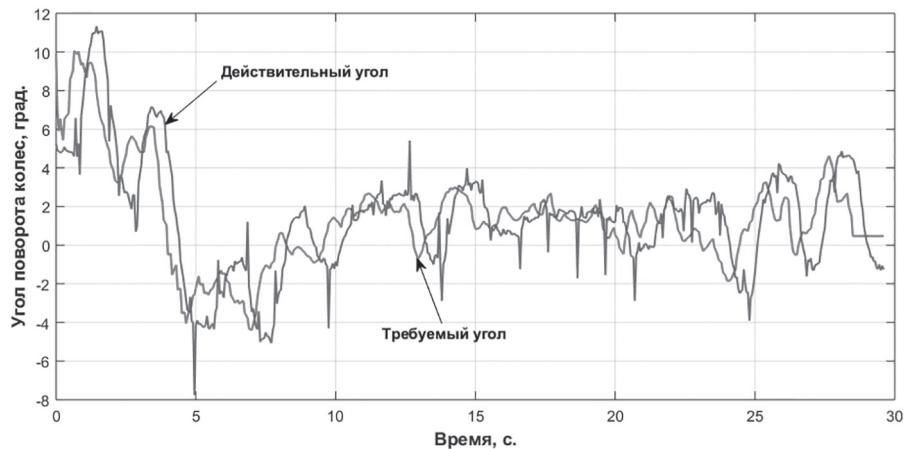


Рис. 6. Требуемый и действительный углы поворота управляемых колес при прямолинейном движении

На рис. 7 представлены задаваемая и реализованная траектории движения при криволинейном движении с  $V_{\text{сред}} = 1,3 \text{ м/с}$ ,  $t_{\text{прогноза}} = 1 \text{ с}$  и  $k_{\text{усилсния}} = 0,5$ ; на рис. 8 – значения требуемого и дей-

ствительного углов поворота управляемых колес.

Максимальная ошибка при данном движении составила  $E_{\max} = 0,61 \text{ м}$ , среднее квадратичное отклонение –  $\sigma = 0,27 \text{ м}$ .

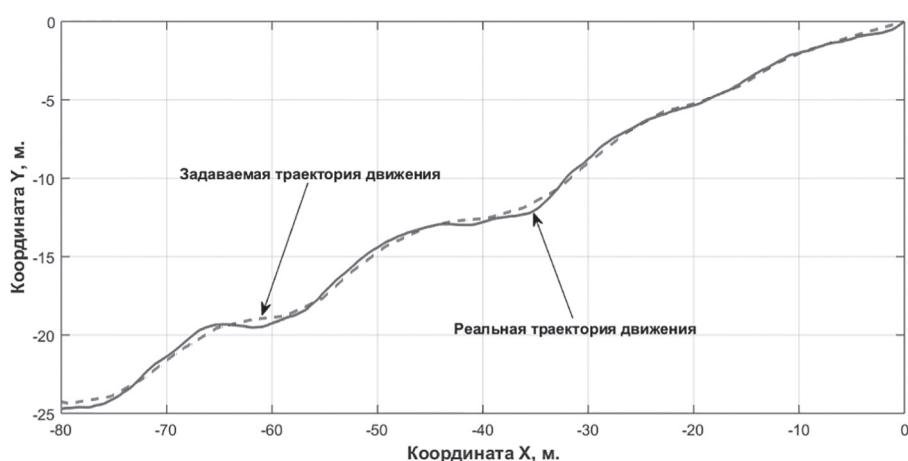


Рис. 7. Задаваемая и реализованная траектории при криволинейном движении

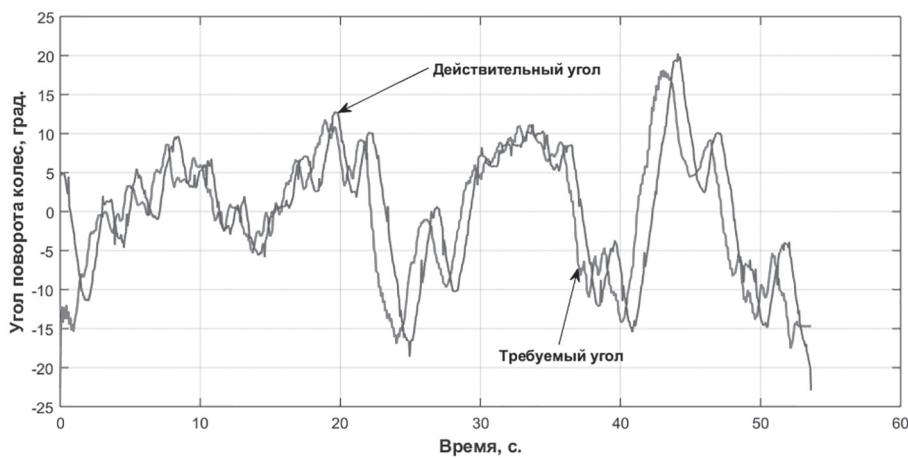


Рис. 8. Требуемый и действительный углы поворота управляемых колес при криволинейном движении

## Выводы

Результаты проведенного эксперимента свидетельствуют о достаточно хорошем функционировании разработанной электромеханической системы управления движения в дорожных условиях. При задаваемом движении, близком к прямолинейному (именно оно является основным при выполнении сельскохозяйственных работ), отклонения от задаваемой траектории не превышают 0,2 м. Система также обеспечивает качественное движение по криволинейной траектории. В перспективе предполагается апробация разработанной электромеханической системы в реальных условиях при проведении полевых работ.

## Литература

1. Игошин А.Н. Повышение экономической эффективности зернопроизводства путем внедрения системы точного земледелия в сельскохозяйственные организации Нижегородской области // Вестник НГИЭИ. 2012. № 5 (12). С. 39–45.
2. Якушев В.П., Лекомцев П.В., Петрушин А.Ф. Точное земледелие: опыт применения и потенциал развития // Информация и космос. 2014. № 3. С. 50–56.
3. Шаталина Л.П. Точное земледелие как один из путей к энергосбережению ресурсов в сельскохозяйственном производстве // АПК России. 2017. Т. 24. № 4. С. 949–953.
4. Авдонина И.А. Точное земледелие – стратегия эффективного развития сельского хозяйства // Научный вестник Технологического института – филиала ФГБОУ ВПО Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина. 2015. № 14. С. 5–10.
5. Ненайденко А.С., Поддубный В.И., Валекжанин А.И. Моделирование управления движением колесной сельскохозяйственной машины в режиме реального времени // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 3. С. 32–38.
6. Ненайденко А.С., Поддубный В.И. Математическое моделирование движения колесной машины в горизонтальной плоскости // Вестник КрасГАУ. 2018. № 3 (138). С. 72–77.
7. Ненайденко А.С., Поддубный В.И., Байбасаров Р.Р. Дорожные испытания системы управления движением колесной машины на тракторе МТЗ-80.1 // Вестник АГАУ. 2018. № 6. С. 156–160.

## References

1. Igoshin A. N. Povyshenie ekonomicheskoy effektivnosti zernoproizvodstva putem vnedreniya sistemy tochnogo zemledeliya v sel'skohozyajstvennye organizacii Nizhe-gorodskoj oblasti. Vestnik NGIEI. 2012. № 5 (12), pp. 39–45 (in Russ.).
2. Yakushev V.P., Lekomcev P.V., Petrushin A.F. Tochnoe zemledelie: opyt prime-neniya i potencial razvitiya. Informaciya i kosmos. 2014. № 3, pp. 50–56 (in Russ.).
3. Shatalina L.P. Tochnoe zemledelie kak odin iz putej k energosberezeniyu resursov v sel'skohozyajstvennom pro-izvodstve. APK Rossii. 2017. Vol. 24. № 4, pp. 949–953 (in Russ.).
4. Avdonina I.A. Tochnoe zemledelie - strategiya efektivnogo razvitiya sel'skogo ho-zyajstva. Nauchnyj vestnik Tekhnologicheskogo instituta - filiala FGBOU VPO Ul'yanovskaya GSHA im. P.A. Stolypina. 2015. № 14, pp. 5–10 (in Russ.).
5. Nenaydenko A.S., Poddubny V.I., Valekzhanin A.I. Modelirovanie upravleniya dvizheniem kolesnoj sel'sko-hozyajstvennoj mashiny v rezhime real'nogo vremeni. Traktory i sel'hozmashiny. 2018. № 3, pp. 32–38 (in Russ.).
6. Nenaydenko A.S., Poddubny V.I. Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya ko-lesnoj mashiny v gorizonta'l'noj ploskosti. Vestnik KrasGAU. 2018. № 3 (138), pp. 72–77 (in Russ.).
7. Nenaydenko A.S., Poddubny V.I., Baybasarov R.R. Dorozhnye ispytaniya sistemy upravleniya dvizheniem kolesnoj mashiny na traktore MTZ-80.1. Vestnik AGAU. 2018. № 6, pp. 156–160 (in Russ.).

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ ЗЕРНО- И КОРМОУБОРОЧНЫХ КОМБАЙНОВ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

## RESEARCH OF DYNAMICS OF MOVEMENT OF GRAIN AND FORAGE HARVESTERS BY METHODS OF MATHEMATICAL AND IMITATING MODELING

П.В. СИРОТИН<sup>1</sup>, к.т.н.

М.М. ЖИЛЕЙКИН<sup>2</sup>, д.т.н.

<sup>1</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,  
г. Новочеркасск, Ростовская область, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, spv\_61@mail.ru

P.V. SIROTIN<sup>1</sup>, PhD in Engineering

M.M. ZHILEJKIN<sup>2</sup>, DSc in Engineering

<sup>1</sup> Platov South-Russian State Polytechnic University,  
Novocherkassk, Russia

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia,  
spv\_61@mail.ru

Рассмотрена математическая модель движения зерно- и кормоуборочного комбайна, показана возможность ее алгоритмизации в программном комплексе, а также приведены данные, подтверждающие ее адекватность. Математическая модель включает динамические и кинематические уравнения связи угловых и линейных скоростей с угловыми и пространственными координатами. Особенность модели заключается в применении набора систем координат, что позволило учесть не только массогабаритные и компоновочные особенности исследуемого вида машин, но и характер взаимодействия эластичного колеса с демпфируемым основанием. В приведенной модели скорость движения комбайна задается не принудительно изменением координаты центра масс остова, а формируется моделированием процесса взаимодействия ведущих колес с опорным основанием. Такой подход обеспечивает более адекватное описание процесса криволинейного движения комбайна, позволяет моделировать трогание машины, разгон, торможение, преодоление препятствий, процессы буксования и юза с учетом характеристик шины и сцепных свойств грунта. Принятый подход обеспечивает достаточную точность модели при минимальном наборе факторов и требований для вычисления. На основе разработанной математической модели составлена модель в среде имитационного моделирования Simulink программного комплекса MATLAB. Представлены экспериментальные и расчетные данные, полученные в результате имитационного моделирования. Сопоставление действующих сил и спектральных плотностей ускорения в основных частях комбайна показало достаточную сходимость результатов. Выявленная неточность обусловлена несоответствием численного описания опорной поверхности и испытательной дороги, представлением остова комбайна как абсолютно жесткого тела, отличиями упруговязких свойств шин. Сделаны выводы и определены направления дальнейших исследований, обеспечивающих улучшение эксплуатационных свойств самоходных комбайнов за счет систем подпрессоривания колес и рабочих органов.

**Ключевые слова:** самоходный комбайн, динамика движения, математическая модель, имитационная модель, подпрессоривание.

The mathematical model of the grain and forage harvester movement is considered, the possibility of its algorithmization in the program complex is shown, and also the data confirming its adequacy are given. The mathematical model includes dynamic and kinematic equations of coupling angular and linear velocities with angular and spatial coordinates. The peculiarity of the model is the use of a set of coordinate systems, which allowed to take into account not only the mass and size features of the type of machines being studied, but also the nature of the interaction of the elastic wheel with the damped base. In the above model, the speed of the combine's movement is determined not by force change in the coordinate of the center of mass of the body, but is formed by modeling the process of interaction between the driving wheels and the support base. This approach provides a more adequate description of the process of curvilinear movement of the combine, allows modeling the car's starting, acceleration, braking, overcoming obstacles, skid and skid processes taking into account the characteristics of the tire and the coupling properties of the ground. The adopted approach provides sufficient accuracy of the model with a minimum set of factors and requirements for computation. Based on the developed mathematical model, a model is created in the simulink simulation environment of the MATLAB software package. Experimental and calculated data obtained as a result of imitation modeling are presented. A comparison of the operating forces and the spectral densities of acceleration in the main parts of the combine showed sufficient convergence of the results. The revealed inaccuracy is caused by the discrepancy between the numerical description of the supporting surface and the test road, the representation of the skeleton as an absolutely rigid body, the differences in the elastic-viscous properties of the tires. Conclusions are drawn and directions for further research providing for improving the operational properties of self-propelled combines by means of wheel suspension systems and working elements are determined.

**Keywords:** self-propelled combine, dynamics of movement, mathematical model, simulation model, suspension.

## Введение

В настоящее время основным средством при уборке продукции растениеводства являются самоходные зерно- и кормоуборочные комбайны, эффективность работы которых во многом определяет рентабельность аграрнопромышленного комплекса как одной из приоритетных отраслей экономики страны [1]. Для повышения производительности комбайны оснашают более эффективными рабочими и функциональными органами, мощными силовыми установками, а также увеличивают их рабочие и транспортные скорости движения. Такие изменения конструкции и эксплуатационных свойств, как правило, приводят к увеличению снаряженной массы машин, что недопустимо по требованиям агроэкологии и ограничено нормами максимального давления на грунт [2]. В связи с этим разработка и внедрение систем, обеспечивающих снижение динамических нагрузок на комбайны и улучшающих их плавность хода, является актуальной практической задачей современного сельхозмашиностроения [1, 3, 4].

## Цель исследования

В современном понимании создание машин и исследование динамики их движения должно базироваться на методах математического и имитационного моделирования, основу которых составляет математическое описание исследуемых процессов [5]. Разработка математических моделей является сложным и наукоемким процессом, который определяет достоверность полученных результатов, продолжительность исследований, затраты на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, а также свойства готовых изделий [6]. Таким образом, основная цель данной работы заключалась в разработке и верификация математической модели движения самоходных колесных зерно- и кормоуборочных комбайнов.

## Материалы и методы

Требования к математической модели динамики комбайнов определяются совокупностью задач, при решении которых необходимо получить информацию для оценки эксплуатационных качеств, в частности:

– модель должна описывать совместную динамику остова, двигателя и элементов ходовой части комбайнов с точностью, необходимой

для устойчивости при движении на недеформируемых грунтах;

– должны быть учтены конструктивные особенности колесных движителей, неудерживающий характер связей, наложенных на комбайн;

– движение комбайна должно моделироваться с учетом характеристик сопротивления и сцепления грунта, так как тягово-сцепные характеристики влияют на скорость движения машины.

При выводе дифференциальных уравнений движения комбайна принят ряд допущений, которые, с одной стороны, должны обеспечить выполнение требований, предъявляемых к математической модели, а с другой – ограничить число моделируемых параметров системы самыми необходимыми [6]. В соответствии с требованиями к математической модели приняты следующие допущения:

– массы подрессоренных элементов комбайна приведены к несущей системе;

– опорное основание полагается недеформируемым (необходимая податливость по нормали к грунту может быть учтена в соответствующих характеристиках шин колес, а тангенциальная податливость грунта учитывается в характеристике его сцепных свойств).

При моделировании динамики движения комбайна его корпус рассматривали как пространственную абсолютно твердую конструкцию. Связь между кинематическими параметрами и внешними возмущениями описывали с помощью дифференциальных уравнений, составляющих математическую модель движения комбайна.

Система уравнений движения самоходного комбайна содержит:

– динамические уравнения, описывающие движение комбайна, полученные на основе закона сохранения количества движения и момента количества движения;

– кинематические уравнения связи угловых и линейных скоростей с угловыми и пространственными координатами, полученные на основе уравнений связи между различными координатными системами.

## Результаты и обсуждение

В разработанной модели применено три различные системы координат (рис. 1), что обусловлено структурой и формой уравнений движения объекта. Первая, неподвижная, система координат (НСК)  $O_2X_2Y_2Z_2$ , служит для

моделирования заданных дорожно-грунтовых условий движения. Начало координат системы (точка  $O_2$ ) совпадает с началом моделируемой трассы (рис. 1, а). Вторая, полусвязанная, система координат  $O_1X_1Y_1Z_1$ , характеризуется тем, что ее начало – точка  $O_1$  всегда совпадает с центром масс комбайна и перемещается вместе с ним в пространстве. Оси  $O_1X_1$ ,  $O_1Y_1$ ,  $O_1Z_1$  параллельны соответствующим осям несвязанной системы координат (рис. 1, а). Третья система координат  $OXYZ$ , используемая для математического описания движения комбайна, является подвижной системой координат (ПСК), ее центр  $O$  всегда совпадает с центром масс  $C$ , а оси совпадают с главными осями инерции комбайна (рис. 1, а). Уравнения динамики комбайна записывали в связанной системе координат, поэтому в качестве параметров движения приняты проекции линейной ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ) и угловой ( $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$ ) скоростей на связанные оси. Использование связанной системы координат для записи уравнений динамики самоходного комбайна определяются следующими соображениями:

– будем считать, что подвижные оси с началом координат в центре масс колесной машины являются главными осями инерции тела и моменты инерции относительно них не зависят от изменения кинематических параметров;

– основные внешние силы, действующие на СК, ориентированы относительно корпуса и наиболее просто выражаются в координатных осях, жестко с ним связанных.

В связи с этим уравнения динамики самоходного комбайна, записанные в ПСК, наи-

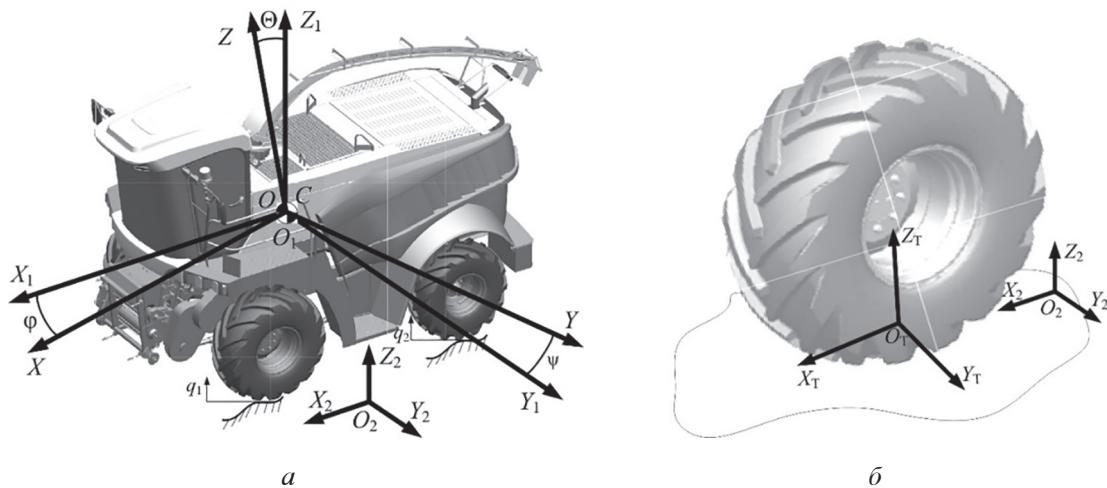
более просты и удобны для последующего решения при достаточно полном отражении процессов взаимодействия движущегося тела и внешней среды. Для определения сил, действующих на комбайн со стороны грунта, введем микроподвижную систему координат (МПСК) и будем понимать под ней систему  $O_TX_TY_TZ_T$ , центр которой  $O_T$  совпадает с геометрическим центром пятна контакта колеса, ось  $O_TX_T$  совпадает с проекцией продольной оси симметрии колеса на опорную поверхность, а ось  $O_TY_T$ , соответственно, с проекцией оси колеса (рис. 1, б).

Первые три уравнения поступательного движения самоходного комбайна получены на основе теоремы об изменении количества движения. Проецируя векторное выражение теоремы на оси системы  $OXYZ$ , получим систему уравнений:

$$\begin{cases} m \frac{dV_{CX}}{dt} + m(\omega_Y V_{CZ} - \omega_Z V_{CY}) = \sum_k F_k^X; \\ m \frac{dV_{CY}}{dt} + m(\omega_Z V_{CX} - \omega_X V_{CZ}) = \sum_k F_k^Y; \\ m \frac{dV_{CZ}}{dt} + m(\omega_X V_{CY} - \omega_Y V_{CX}) = \sum_k F_k^Z, \end{cases} \quad (1)$$

где  $m$  – масса СК;  $F_k^X$ ;  $F_k^Y$ ;  $F_k^Z$  – силы, действующие на корпус СК;  $V_{CX}$ ,  $V_{CY}$ ,  $V_{CZ}$  – проекции вектора линейной скорости точки  $C$  на оси ПСК  $OXYZ$ ;  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  – проекции вектора угловой скорости СК на оси ПСК  $OXYZ$ .

Уравнения динамики вращательного движения корпуса комбайна вокруг центра масс



**Рис. 1. Положение самоходного комбайна в пространстве (а) и микроподвижной системе координат (б):**

$C$  – центр масс комбайна;  $\varphi$ ,  $\psi$ ,  $\Theta$  – углы, соответственно, дифферента, крена, курса;

$q_i$  – вертикальная координата дорожной поверхности

получены на основе теоремы об изменении главного момента количества движения. В векторной форме (для общего случая) в соответствии с формулой Бура

$$\frac{d\bar{K}_0}{dt} + \bar{\omega} \times \bar{K}_0 = \bar{L}_0^{(e)},$$

где  $\bar{K}_0 = \frac{J\bar{\omega}}{dt}$  – главный момент количества движения;  $\frac{d\bar{K}_0}{dt}$  – локальная производная по времени от главного момента количества движения твердого тела относительно центра масс  $C$ ;  $\bar{L}_0^{(e)} = \sum_{k=1}^N \bar{I}_k \cdot \bar{F}_k^{(e)}$  – главный момент внешних сил, приложенных к твердому телу, относительно того же центра;  $\bar{r}_k$  – вектор, определяющий точку приложения внешний сил.

Раскрыв проекции векторного произведения  $(\bar{\omega} \cdot \bar{K}_0)$  и подставив компоненты из развернутой формулы Бура, получим следующую систему динамических уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_x \frac{d\omega_x}{dt} - J_{xy} \frac{d\omega_y}{dt} - J_{xz} \frac{d\omega_z}{dt} + J_{yz} (\omega_z^2 - \omega_y^2) + \\ + \omega_z \omega_y (J_z - J_y) - \omega_x \omega_y J_{xz} - \omega_z \omega_x J_{xy} = L_x^{(e)}; \\ - J_{yx} \frac{d\omega_x}{dt} + J_y \frac{d\omega_y}{dt} - J_{yz} \frac{d\omega_z}{dt} + J_{zx} (\omega_x^2 - \omega_z^2) + \\ + \omega_x \omega_z (J_x - J_z) - \omega_x \omega_y J_{yz} - \omega_z \omega_y J_{xy} = L_y^{(e)}; \\ - J_{zx} \frac{d\omega_x}{dt} - J_{yz} \frac{d\omega_y}{dt} + J_z \frac{d\omega_z}{dt} + J_{xy} (\omega_y^2 - \omega_x^2) + \\ + \omega_x \omega_y (J_y - J_x) - \omega_x \omega_z J_{yz} - \omega_z \omega_y J_{xz} = L_z^{(e)}. \end{array} \right. \quad (2)$$

В частном случае совпадения выбранных осей с осями эллипсоида инерции корпуса система уравнений (2) принимает вид динамических уравнений Эйлера. Запишем их в проекции на оси ПСК

$$\left\{ \begin{array}{l} J_x \dot{\omega}_x + (J_z - J_y) \omega_y \omega_z = L_x; \\ J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \omega_z \omega_x = L_y; \\ J_z \dot{\omega}_z + (J_y - J_x) \omega_x \omega_y = L_z. \end{array} \right.$$

Таким образом, используя теоремы об изменении количества движения тела и момента количества движения в проекциях на оси ПСК на основе уравнений (1) и (2) получим общие уравнения движения самоходного комбайна:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_k \frac{dV_{Cx}}{dt} + m_k (\omega_y V_{Cz} - \omega_z V_{Cy}) = G_x + F_x + \sum_{i=1}^N R_{xi}; \\ m_k \frac{dV_{Cy}}{dt} + m_k (\omega_z V_{Cx} - \omega_x V_{Cz}) = G_y + F_y + \sum_{i=1}^N R_{yi}; \\ m_k \frac{dV_{Cz}}{dt} + m_k (\omega_x V_{Cy} - \omega_y V_{Cx}) = G_z + F_z + \sum_{i=1}^N R_{zi}; \\ I_x \frac{d\omega_x}{dt} + \omega_x \omega_z (I_z - I_y) = M_x(F) + \\ + \sum_{i=1}^N M_x [R_{zi}] - \sum_{i=1}^N M_z [R_{yi}]; \\ I_y \frac{dy}{dt} + \omega_z \omega_x (I_x - I_z) = M_y(F) - \\ - \sum_{i=1}^N M_y [R_{xi}] + \sum_{i=1}^N M_y [R_{zi}]; \\ I_z \frac{d\omega_z}{dt} + \omega_x \omega_y (I_y - I_x) = M_z(F) + \\ + \sum_{i=1}^N M_z [R_{yi}] - \sum_{i=1}^N M_z [R_{xi}] + \sum_{i=1}^N M_{nki}, \end{array} \right.$$

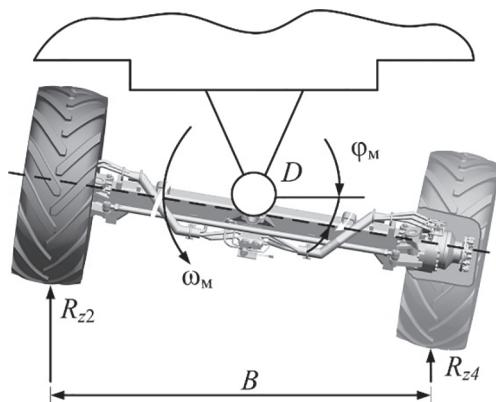
где  $G_x, G_y, G_z$  – проекции вектора силы тяжести на оси ПСК  $OXYZ$ ;  $F_x, F_y, F_z$  – проекции вектора силы внешнего воздействия на оси ПСК  $OXYZ$ ;  $R_{xi}, R_{yi}, R_{zi}$  – проекции силы взаимодействия между колесом и опорной поверхностью на оси ПСК  $OXYZ$ ;  $M_x(F), M_y(F), M_z(F)$  – проекции момента от силы внешнего воздействия на оси ПСК  $OXYZ$ ;  $M_x(R_{yi}), M_y(R_{xi}), M_z(R_{yi}), M_z(R_{xi})$  – проекции моментов на оси ПСК от проекций сил взаимодействия между грунтом и колесом на оси ПСК;  $M_{nki}$  – проекции момента сопротивления повороту  $i$ -го колеса на ось  $Z$  ПСК;  $I_x, I_y, I_z$  – моменты инерции комбайна относительно осей ПСК  $OXYZ$ ;  $m_k$  – масса комбайна;  $N$  – число колес комбайна.

Положение самоходного комбайна в пространстве в любой момент времени определяется взаимным расположением полусвязанной и подвижной систем координат, которые характеризуются тремя угловыми координатами – углами Эйлера – Крылова:  $\Theta$  – угол «рысканья»;  $\phi$  – угол «дифферента»;  $\psi$  – угол «крана». Связь углов Эйлера – Крылова с другими кинематическими параметрами вращательного движения – проекциями угловой скорости на связанные оси – устанавливают на основе кинематических соотношений, которые называются уравнениями связи вращательного движения:

$$\begin{cases} \frac{d\psi}{dt} = \omega_x \cos \varphi + \omega_z \sin \varphi; \\ \frac{d\Theta}{dt} = \frac{\omega_z \cos \varphi - \omega_x \sin \varphi}{\cos \psi}; \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega_y - \operatorname{tg} \psi (\omega_z \cos \varphi - \omega_x \sin \varphi). \end{cases} \quad (3)$$

Поскольку случай переворота машины не рассматривается, т.е.  $\psi < \pi/2$ , система (3) не вырождается.

При исследовании динамики движения комбайна следует учитывать имеющиеся подвижные звенья как сложную динамическую систему. Для существующих компоновок самоходных комбайнов единственным подвижным звеном относительно их остова является мост ведущих колес, расчетная схема угловых колебаний которого представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Расчетная схема угловых колебаний заднего моста самоходного комбайна относительно корпуса:**

$\omega_m$ ,  $\varphi_m$  – угловая скорость и угол поворота моста относительно продольной оси, проходящей через точку  $D$ ;  $B$  – колея колес

Дифференциальное уравнение угловых колебаний моста относительно продольной оси, проходящей через точку  $D$  в ПСК, имеет вид:

$$J_{MX} \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{(R_{z2} - R_{z4})B \cos(\varphi_m)}{2},$$

где  $J_{MX}$  – момент инерции моста относительно оси  $X$ .

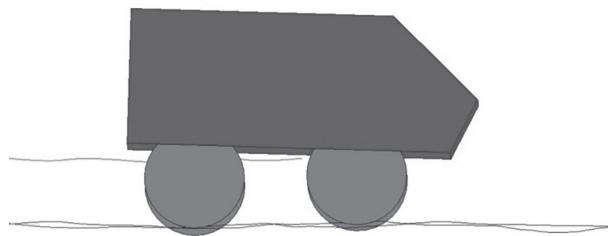
Особенности взаимодействия колеса с опорным основанием представлены в соответствии с известной и апробированной методикой [7] как качение эластичного колеса по неровностям недеформируемого основания. В таком случае в математической модели скорость движения комбайна задается не принудительно

изменением координаты центра масс кузова, а формируется моделированием процесса взаимодействия ведущих колес с опорным основанием. Это позволяет не только более адекватно представлять движение МСК по неровностям, но и моделировать трогание машины, разгон, торможение, преодоление препятствий, процессы буксования и юза с учетом характеристик шины и сцепных свойств грунта [7, 8].

Разработанная модель была реализована в среде имитационного моделирования Simulink программного комплекса MATLAB, что позволило провести оценку ее работоспособности на примере кормоуборочного комбайна RSM 2650 (рис. 3, *a*). В качестве исходных данных использовали массогабаритные характеристики основных элементов комбайна в наиболее рас-



*а*



*б*

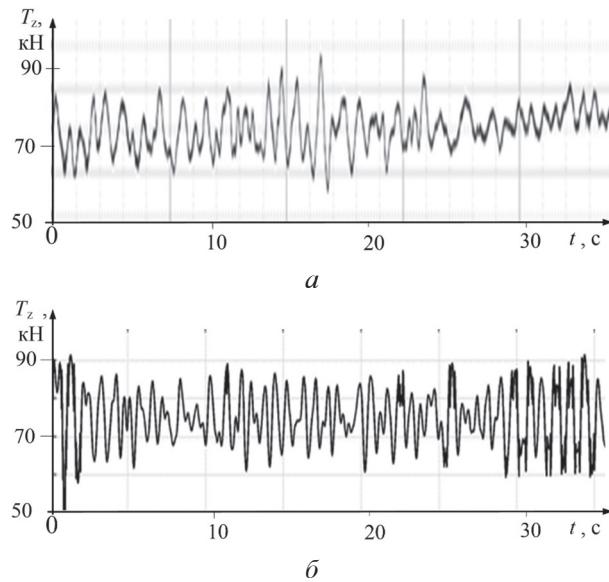


*в*

**Рис. 3. Кормоуборочный комбайн RSM 2650 (*а*), его схематическая (*б*) и 3D-анимированная (*в*) модель в Simulink**

пространенной и серийно выпускаемой модификации. Упруго-диссипативные свойства шин приняты на основе данных, предоставленных их производителем. На рис. 3 представлена сгенерированная схематическая анимация результатов моделирования в Simulink (рис. 3, б), а также 3D-анимация, полученная наложением на модель облика комбайна и визуализирующая динамику его движения (рис. 3, в).

По результатам экспериментальных исследований и моделирования динамики движения комбайна RSM2650 построены спектрограммы действующих усилий (реакции) в вертикальной плоскости, передаваемых от колес на балку ведущего моста ( $T_z$ ) (рис. 4), а также спектры ускорений на ведущем мосту ( $G_z$ ) (рис. 5) при движении комбайна по грунтовой дороге со скоростью 8 км/ч.



**Рис. 4. Осциллограммы усилия на балке моста ведущих колес в вертикальной плоскости, полученные экспериментально (а) и по результатам имитационного моделирования (б)**

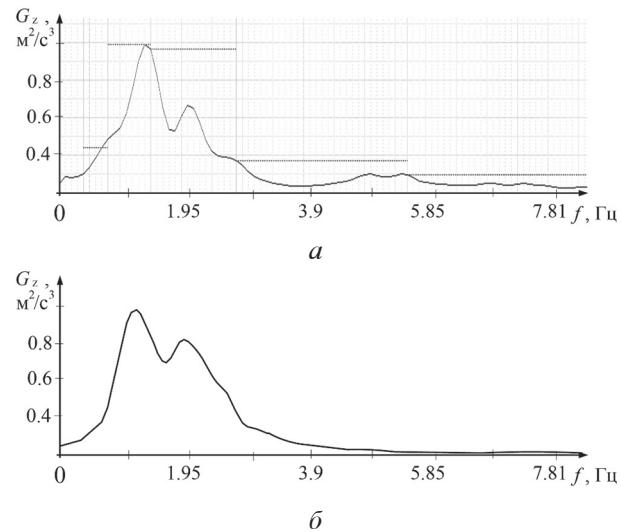
Полученные данные свидетельствуют о достаточной сходимости результатов. Так, средние значения нагрузок отличаются от эксперимента на 4–7 %, а пиковые – на 8–17 %. Отличия обусловлены, прежде всего, несогласием численного описания опорной поверхности и дороги, на которой были проведены натурные испытания. На точность расчета также повлияло представление модели комбайна как абсолютно жесткого тела, хотя в реальности несущая конструкция обладает некоторой податливостью, которую на данном этапе исследований учесть достаточно сложно.

Высокая сходимость отмечена и на графиках, отражающих спектральную плотность сигналов на мосту передних колес (рис. 5), где выделяются две моды колебаний, которые, как показали предыдущие исследования [9, 10], отражают вертикальные и продольно-угловые колебания комбайна на пневматических шинах. На графиках видно некоторое смещение максимального значения сигнала по частоте: кривая, полученная в результате моделирования, имеет максимум при частоте 1,1 Гц, а по результатам экспериментальных исследований – 1,2 Гц. Разницу можно объяснить отличием параметров упруго-диссипативных свойств шин в модели от реальных значений.

## Выводы

1. Разработанная математическая модель, базирующаяся на фундаментальных законах динамики, обладает достаточной точностью для исследования динамики движения зерно- и кормоуборочных комбайнов и может быть использована с целью оценки уровня действующих нагрузок в различных частях и элементах комбайнов, что позволяет применять ее для исследований, при проектировании новых машин или модернизации существующих.

2. Для принятой конструкции и компоновки комбайнов существенно снизить нагрузки от действия кинематических возмущений невозможно из-за отсутствия систем подпрессоривания и жестких связей между основными элементами, в связи с чем требуется рассмотреть



**Рис. 5. Спектральная плотность ускорений на мосту ведущих колес, полученная экспериментально (а) и по результатам имитационного моделирования (б)**

нетрадиционные для самоходных машин способы стабилизации, например, за счет динамического демпфирования колебаний в подвеске адаптера.

## Литература

1. Бабкин К.А. Разумная промышленная политика или как нам выйти из кризиса. М., 2008. 100 с.
2. Рusanov V.A. Problema pereuplotneniya pochv dvizhitelyami i effektivnye puti ee resheniya [The problem of soil compaction by propellers and its effective solutions]. Moscow: 1998. 368 p.
3. Butov A.M. Rynok sel'skohozyajstvennyh mashin 2016 g. [Agricultural machines market of 2016]. EH-konomich-eskij analiz segmenta mirovogo rynka. Nacional'nyj issledovatel'skij institut «Vysshaya shkola ehkonomiki». Centr razvitiya [Economic analysis of the global market segment. National Research Institute “Higher School of Economics”. Development Center]. 2016. 68 p.
4. Sirotin P.V., Zhilejkin M.M., Sapugin A.G., Zlenko S.V. Prerequisites for the creation of a complex system of horizontal and springing frame of combine harvesters. Traktory i sel'hozmashiny. 2017. No 11, pp. 21–29 (in Russ.).
5. Zarubin V.S., Kuvyrkin G.N. Features of mathematical modeling of technical devices. Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody. 2014. № 1. С. 5–17.
6. Zhilejkin M.M., Sarach E.B. Matematicheskaya model' dvizheniya mnogoosnnoy kol'sesnoy masziny s podatlivoy na kruchenie nesushchey sistemoy // Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody. 2015. № 3. С. 17–40.
7. Zhilejkin M.M., Padalkin B.V. Matematicheskaya model' kacheniya elastichnogo kol'sa po nerovnostiam nedeformируемogo osnovaniya // Izv. vuzov. Mashinostruение. 2016. № 3. С. 24–29.
8. Zhilejkin M.M. Teoreticheskie osnovy povysheniya pokazateley ustoychivosti i upravlyemosti kol'sesnykh maszin na baze metodov nechetkoy logiki. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2016. 238 c.
9. Sirotin P.V., Sapugin A.G., Zlenko S.V. Ekspertimental'naya otsenka plavnostiхода самоходnogo kormoуборочного комбайна // Труды НАМИ. 2017. № 4 (271). С. 67–74.
10. Sirotin P.V., Lebedinskij I.YU., Kravchenko V.V. Analiz vibroakusticheskoy нагруженности рабочего места операторов зерноуборочных комбайнов // Современные научно-исследовательские технологии. Региональное приложение. 2018. № 1 (53). С. 113–121.

## References

1. Babkin K.A. Razumnaya promyshlennaya politika ili kak nam vyjti iz krizisa [Reasonable industrial policy or how we get out of the crisis]. Moscow: 2008. 100 p.
2. Rusanov V.A. Problema pereuplotneniya pochv dvizhitelyami i effektivnye puti ee resheniya [The problem of soil compaction by propellers and its effective solutions]. Moscow: 1998. 368 p.
3. Butov A.M. Rynok sel'skohozyajstvennyh mashin 2016 g. [Agricultural machines market of 2016]. EH-konomich-eskij analiz segmenta mirovogo rynka. Nacional'nyj issledovatel'skij institut «Vysshaya shkola ehkonomiki». Centr razvitiya [Economic analysis of the global market segment. National Research Institute “Higher School of Economics”. Development Center]. 2016. 68 p.
4. Sirotin P.V., Zhilejkin M.M., Sapugin A.G., Zlenko S.V. Prerequisites for the creation of a complex system of horizontal and springing frame of combine harvesters. Traktory i sel'hozmashiny. 2017. No 11, pp. 21–29 (in Russ.).
5. Zarubin V.S., Kuvyrkin G.N. Features of mathematical modeling of technical devices. Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody. 2014. № 1, pp. 5–17 (in Russ.).
6. Zhilejkin M.M., Sarach E.B. Mathematical model of the motion of a multi-axle wheeled vehicle with a torsion-resistant carrier system. Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody. 2015. No 3, pp. 17–40 (in Russ.).
7. Zhilejkin M.M., Padalkin B.V. Mathematical model of an elastic wheel rolling on unevenness of a non-deformable base. Izv. vuzov. Mashinostroenie. 2016. No 3, pp. 24–29 (in Russ.).
8. Zhilejkin M.M. Teoreticheskie osnovy povysheniya pokazateley ustojchivosti i upravlyemosti kol'sesnykh maszin na baze metodov nechetkoy logiki [Theoretical basis for improving the stability and controllability of wheeled vehicles based on fuzzy logic methods]. Moscow: Izd-vo MG TU im. N.EH. Baumana, 2016. 238 p.
9. Sirotin P.V., Sapugin A.G., Zlenko S.V. Experimental evaluation of the smoothness of the self-propelled forage harvester. Trudy NAMI. 2017. No 4 (271), pp. 67–74 (in Russ.).
10. Sirotin P.V., Lebedinskij I.YU., Kravchenko V.V. The analysis of vibro-acoustic loading of the combine harvesters operators workplace. Sovremennyye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie. 2018. No 1 (53), pp. 113–121 (in Russ.).

# ФРИКЦИОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПОВОРОТА В ДВУХПОТОЧНЫХ ТРАНСМИССИЯХ ТРАНСПОРТНЫХ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН

## FRictional STEERING DEVICES IN TWO-FLOW TRANSMISSIONS OF TRANSPORT CATERPILLAR VEHICLES

Н.Н. ДЕМИДОВ, к.т.н.  
Р.Ю. ДОБРЕЦОВ, к.т.н.  
М.С. МЕДВЕДЕВ

Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия,  
dr-idpo@yandex.ru

N.N. DEMIDOV, PhD in Engineering  
R.YU. DOBRETSOV, PhD in Engineering  
M.S. MEDVEDEV

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University,  
Saint-Petersburg, Russia, dr-idpo@yandex.ru

Проблема качества управления поворотом является общей для гусеничных машин различного назначения, особенно для быстроходных транспортных машин. Обычно данную проблему решают применением двухпоточной трансмиссии с использованием гидростатической передачи в параллельном потоке мощности с трансформирующим механизмом (центральные или бортовые коробки передач). В статье предложено использовать фрикционный механизм поворота в составе замкнутой (следящей) системы управления как альтернативу гидростатической передаче. Для контроля над усилием сжатия и, соответственно, буксованием дисков фрикционного механизма поворота применяется принцип широтно-импульсной модуляции рабочего давления. Проведена оценка рассеиваемой мощности на буксующем элементе управления фрикционного механизма поворота, установленного в трансмиссии гусеничной машины с бортовыми коробками передач массой 42 тонны. Установлено, что при наиболее вероятном радиусе поворота рассеиваемая мощность не превышает 50 кВт. Кроме того, в работе представлены кинематические схемы одноступенчатого и двухступенчатого фрикционного механизма поворота. Одноступенчатый фрикционный механизм поворота был апробирован на ходовых испытаниях гусеничной машины с бортовыми коробками передач; его применение ограничено одним расчетным радиусом поворота и высокой нагруженностью фрикционных элементов управления. Применение двухступенчатого механизма поворота позволяет снизить износ дисков элементов управления и более плавный поворот, по сравнению с одноступенчатым, но несколько усложняет конструкцию. Также приведена схема двухпоточной трансмиссии с центральной коробкой передач. Ожидается, что мощность рассеиваемая на фрикционном механизме поворота окажется выше, чем при использовании в трансмиссии с бортовыми коробками передач. Таким образом, расчеты и испытания показывают, что фрикционные механизмы поворота способны заменить гидростатическую передачу в механизме поворота гусеничной машины, особенно в условиях плотной компоновки трансмиссионного отделения, где другие варианты пока невозможны.

**Ключевые слова:** гусеничная машина, фрикционный механизм поворота, замкнутая система управления поворотом, буксование, широтно-импульсная модуляция, двухпоточная трансмиссия.

The problem of quality of management of turn is the general for tracked vehicles of different function, especially for high-speed transport vehicles. Usually, this problem is solved application of two-flow transmission with use of hydrostatic gear in a parallel flow of power with the transforming mechanism (the central or onboard gearboxes). In the article is offered to use the frictional steering device as a part of the closed-loop (servo) control system as an alternative to hydrostatic gear. To control over effort of compression and, respectively, slipping of disks of the frictional steering device applies the principle of pulse-width modulation of power pressure. Assessment of power dissipation capability on the slipping element of management of the frictional steering device installed in transmission of the tracked vehicle with onboard gearboxes weighing 42 tons is carried out. It is established that at the most probable turning radius power dissipation capability doesn't exceed 50 kW. Besides, in article kinematic schemes of the one-stage and two-level frictional steering device are provided. The one-stage frictional steering device was tested on ride tests of the tracked vehicle with onboard gearboxes, its application is limited to one rated turning radius and high loading of frictional elements. Use of the two-level steering device will allow to reduce wear of disks of elements of management and smoother turn, in comparison with one-stage, but will complicate a design a little. The scheme of two-line transmission with the central gearbox is also provided. It is expected that the power disseminated on the frictional steering device will be higher, than when using in transmission with onboard gearboxes. Thus, calculations and tests show that frictional steering devices are capable to replace hydrostatic gear in the steering device of the tracked vehicle, especially in the conditions of dense configuration of transmission department where other options are still impossible.

**Keywords:** caterpillar vehicle, frictional steering device, closed-loop control system of steering, slipping, pulse-width modulation, two-flow transmission.

## Введение

Проблема качества управления поворотом (обеспечение наилучшей управляемости при минимуме дополнительных энергозатрат) является общей для гусеничных машин различного назначения. Для транспортных машин, движущихся с большими скоростями, эта проблема стоит более остро. Традиционный путь ее решения – выбор оптимальной для данного транспортного средства конструкции механизма поворота.

Считается [1, 2], что с точки зрения обеспечения однозначного соответствия органа управления и величины радиуса поворота, а также плавности изменения радиуса, наилучшим решением является применение многопоточной трансмиссии с использованием гидростатической (гидрообъемной) передачи (ГСП) в параллельном с трансформирующим механизмом потоке мощности. В качестве трансформирующего механизма часто используются центральная гидромеханическая коробка передач или бортовые планетарные механические коробки передач. Первый вариант характерен для зарубежных машин. В СССР была создана гусеничная машина с двухпоточной трансмиссией, содержащей бортовые коробки передач.

Основным техническим недостатком такого решения оказалась необходимость обеспечить высокую удельную мощность ГСП. Следствием являются большие давления в передаче. Серийный выпуск агрегатов с потребными характеристиками в СССР оказался на тот момент невозможным. В качестве альтернативы ГСП было предложено использовать фрикционный механизм поворота (ФМП).

Использование ФМП имеет смысл в составе замкнутой (следящей) системы управления. Разработка таких систем велась в Ленинградском политехническом институте (сейчас – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого) для однопоточной трансмиссии с бортовыми коробками передач [3]. Найденные технические решения позволили решить вопрос об обеспечении контроля над буксированием дискового тормоза в составе ФМП и тем самым гарантировать плавность изменения радиуса поворота машины и однозначность соответствия между положением органа управления и величиной радиуса поворота.

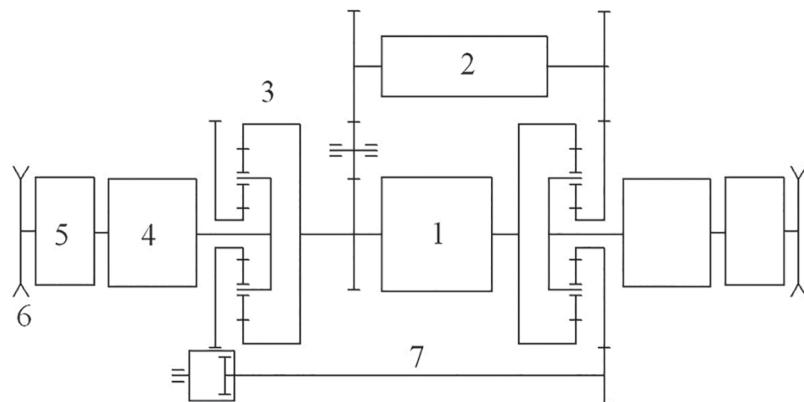
## Цель работы

Обосновать перспективность применения ФМП в составе двухпоточной трансмиссии транспортной гусеничной машины.

При этом рассматриваются: принцип контроля над буксированием дисков фрикционного элемента управления; предложенные в ЛПИ (позже – в СПбПУ) технические решения по интеграции ФМП в состав трансмиссии и конкретные схемы ФМП.

## Методы и средства проведения исследований

Принципиальная схема двухпоточной трансмиссии гусеничной машины с бортовыми коробками передач показана на рис. 1. В параллельном потоке мощности, в принципе, может располагаться ГСП (штатный вариант), фрикционное устройство или управляемый электромотор (ЭМ).



**Рис. 1. Схема двухпоточной трансмиссии с бортовыми коробками передач:**

1 – двигатель; 2 – ГСП, ФМП или ЭМ; 3 – суммирующий планетарный ряд; 4 – бортовая коробка передач; 5 – бортовая передача; 6 – ведущее колесо борта; 7 – межбортовая связь

В режиме прямолинейного движения выходной вал передачи 2 остановлен. Вследствие этого неподвижны солнечные шестерни суммирующих планетарных рядов 3, и эти ряды выполняют роль ступени бортовой передачи.

При повороте выходной вал агрегата 2 вращается. Дифференциальная связь между бортами обеспечивается через передачу 7 (ее передаточное число равно -1). Потоки мощности от двигателя и агрегата 2 суммируются на планетарных рядах 3. Как следствие, один из бортов становится забегающим, а другой – отстающим, и машина входит в поворот.

Реализовать плавное изменение радиуса поворота и однозначность соответствия положения органа управления (рычаги или штурвал) и величины радиуса можно, применяя следящую систему управления. Параметром, по которому осуществляется обратная связь, является угловая скорость машины или разница угловых скоростей бортов.

При условии сохранения компоновки моторно-трансмиссионного отделения единственной альтернативой гидростатической передаче оказывается фрикционное устройство. При рассмотрении ряда вариантов было предложено скомпоновать фрикционные элементы управления в единый агрегат, получивший название ФМП.

Для обеспечения контроля над буксованием дисков ФМП применен принцип широтно-импульсной модуляции давления. Он заключается в том, что в гидравлическую систему управления встраивается электромагнитный клапан, работающий в импульсном режиме и подающий жидкость в систему по закону, близкому к прямоугольному. Рабочие частоты находятся в пределах 4–15 Гц. Амплитуда импульсов постоянна, а соотношение периода открытия и закрытия клапана может изменяться. За счет этого в гидросистеме формируется некоторое среднее рабочее давление, величина которого хорошо контролируется. Следствием является контроль над усилием сжатия пакета дисков фрикционного элемента управления, а значит – контроль над буксованием пакета и угловой скоростью выходного вала ФМП. Поскольку в рамках задачи о замене гидростатической передачи на ФМП нас интересует не выходная скорость вала ФМП, а угловая скорость поворота машины, параметром обратной связи остается разность угловых скоростей ведущих колес отстająceго и забегающего бортов.

Применение ФМП подразумевает рассеивание некоторой части энергии, получаемой от двигателя. Схематически механизм поворота любой структуры, отвечающий требованиям линейной связи между входными и выходными скоростями (или моментами), может быть представлен, как «черный ящик» (рис. 2). Важно, что мощность, рассеиваемая на буксующем элементе управления, не зависит от структуры механизма, а определяется его внешними параметрами (набором передаточных отношений, определяемых при некоторых наложенных на систему связях) и условиями внешней среды.

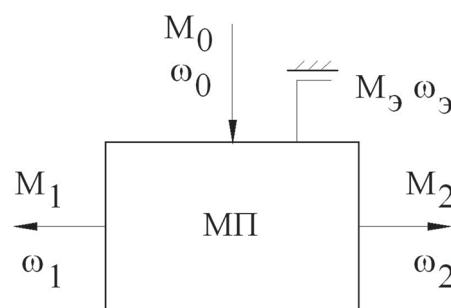


Рис. 2. Схема механизма поворота (МП) с фрикционным регулированием радиуса поворота:

М и  $\omega$  – моменты и угловые скорости звеньев; индексы: 0 – входное звено, э – буксующий элемент управления, 1 и 2 – выходные звенья

Данный подход применяется при кинематическом и силовом анализе механизма поворота [4], а также при расчетных оценках энергоэффективности таких механизмов [5,6] при работе в составе шасси.

Подробно методика анализа мощностного баланса механизма поворота изложена в статье [4]. Оценим мощность  $N_3$ , рассеиваемую на буксующем элементе управления.

Воспользуемся зависимостью:

$$N_3 = (P_1 + u_0 P_2)(V_{1\phi} - V_1).$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – силы тяги на отстаяющей и забегающей гусеницах;  $u_0$  – передаточное отношение механизма поворота при остановленном ведущем звене и полностью выключенном элементе управления (для случая бортовых коробок передач  $u_0 = 0$ );  $V_{1\phi}$  и  $V_1$  – фиксированная и текущая скорости отстаящего борта [4]. Величины сил тяги определяются по традиционным расчетным зависимостям для случая поворота на горизонтальной поверхности без учета скольжения гусениц [1, 2]. В данном случае такое упрощение задачи допустимо. Фиксиро-

ванная скорость отстающего борта рассчитывается по зависимости:

$$V_{1\phi} = V_{\text{пп}} \cdot \frac{\rho_{\phi} - 0,5}{\rho_{\phi} + q_m}, \text{ м/с,}$$

где  $V_{\text{пп}}$  – скорость прямолинейного движения до входа в поворот;  $\rho_{\phi}$  – относительный фиксированный радиус поворота;  $q_m$  – кинематический параметр механизма поворота (в рассматриваемом случае  $q_m = 0,5$ ; при этом величины неуправляемого и свободного радиусов поворота совпадают).

Величина  $\rho_{\phi}$  определяется гаммой передаточных чисел:  $\rho_{\phi} = 0,5(u_{\phi} + 1)/(u_{\phi} - 1)$ . Здесь передаточное отношение между бортами есть соотношение передаточных чисел в бортовых коробках на данном режиме поворота:  $u_{\phi} = u_2/u_1$ .

Линейная скорость борта определяется кинематикой поворота [6]

$$V_1 = V_{\text{пп}} \cdot \frac{\rho - 0,5}{\rho + q_m}, \text{ м/с.}$$

Для определения величины относительного радиуса неуправляемого поворота использована зависимость:

$$\rho_h = \left( \frac{\mu_{\max}}{\mu_h} - 0,925 \right) / 0,15,$$

где  $\mu_h = 4q_m \cdot f \cdot B/L$  – величина коэффициента сопротивления повороту, соответствующая режиму неуправляемого поворота [4].

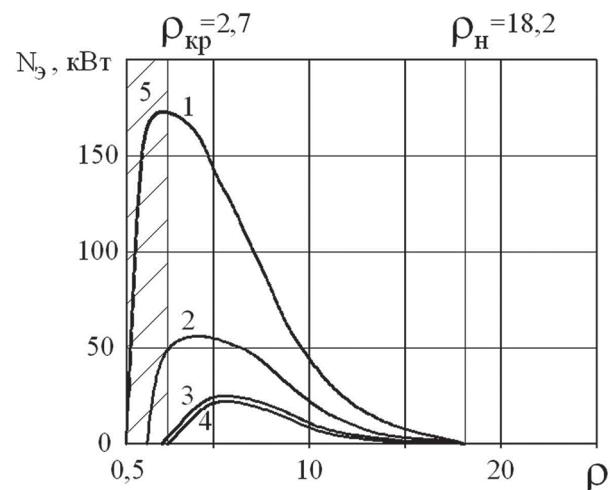
## Результаты анализа и их обсуждение

Расчеты производятся для шасси с бортовыми коробками передач: масса  $m = 42\,000$  кг; длина опорной поверхности и ширина колеи  $L = 4,31$  м и  $B = 2,80$  м; гамма передаточных отношений: 4,378; 2,159; 1,459; 1,000.

Расчетный режим движения машины выбирается на основании статистических данных ОАО «ВНИИ Трансмаш» [5, 7]. Для дальнейших расчетов приняты следующие значения величин: коэффициент сопротивления качению  $f = 0,1$ ; коэффициент сопротивления повороту  $\mu_{\max} = 0,5$ ; относительный радиус поворота  $\rho = 10$ ; скорость движения  $V = 7$  м/с. Понятие относительного радиуса поворота вводится, как  $\rho = R/B$ , где  $R$  – радиус поворота машины, м.

На рис. 3 показаны результаты оценочных расчетов  $N_s$  для случая поворота машины с бортовыми коробками передач. Из рисунка 3

видно, что в зоне наиболее вероятного радиуса поворота на элементе управления рассеивается мощность, не превышающая 50 кВт. В тяжелых дорожных условиях эта величина приближается к 100 кВт (при повороте на второй передаче).



**Рис. 3. Мощность, рассеиваемая на буксующем элементе управления в трансмиссии гусеничной машины с бортовыми коробками передач при повороте с относительным радиусом меньше  $\rho_h$ :**  
отстающий борт: 1 – остановочный тормоз;  
2 – I передача; 3 – II передача; 4 – III передача;  
5 – зона заноса машины при скорости 10 м/с;  
забегающий борт: I передача; II передача;  
III передача; IV – передача

Одним из важных преимуществ двухпоточного варианта трансмиссии (рис. 1) является как раз снижение мощности буксования.

При работе над конструкцией одноступенчатого ФМП решался в первую очередь вопрос замены им ГСП в составе трансмиссии (рис. 1).

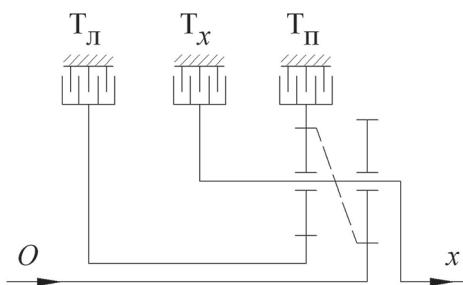
ГСП в данной конструкции позволяет бесступенчато регулировать радиус поворота машины в пределах от бесконечности (прямолинейное движение) до 12 м. Главный недостаток данной трансмиссии – при уменьшении радиуса поворота в диапазоне от 25 до 12 м резко возрастает значение крутящего момента, который должен передать гидромотор. Это требует повышения рабочего давления в передаче до 600...800 кг/см<sup>2</sup>. В указанном диапазоне радиусов резко падает объемный КПД передачи, происходит ее перегрев, а требуемый крутящий момент не достигается. В этой ситуации «в помощь» ГМП подключается гидрозамедлитель соответствующего борта (на рис. 3 не показан, выполнен в смежном корпусе с бор-

товой коробкой передач). Такое решение также имеет недостатки: повышенное тепловыделение и усложнение системы управления трансмиссией.

Допустимый с точки зрения кинематики такой трансмиссии поворот машины вокруг центра тяжести также невозможно реализовать из-за слишком больших потребных значений давления в передаче.

С целью устранения указанных недостатков предлагается заменить ГСП фрикционным механизмом поворота с управляемым скольжением фрикционного элемента.

Кинематическая схема одноступенчатого ФМП, предложенная в ходе работ по модернизации трансмиссии д.т.н. проф. В.Б. Шеломовым (СПбПУ), показана на рис. 4. Испытаниями и доводкой механизма занималась научная группа кафедры «Колесные и гусеничные машины»: к.т.н. А.П. Григорьев, к.т.н., доц. Н.Н. Демидов и др.



**Рис. 4. Кинематическая схема одноступенчатого ФМП:**

*O* – ведущее и ведомое звенья;

$T_l$  и  $T_n$  – тормоза для поворота налево и направо;

$T_x$  – тормоз выходного звена

Механизм включает в себя планетарный четырехзвенник и три фрикционных элемента управления:  $T_x$  – тормоз прямолинейного движения,  $T_n$  и  $T_l$  – тормоза правого и левого поворота. Входной вал  $O$  приводится во вращение от двигателя, выходной вал  $x$  соединен через зубчатую передачу с солнечной шестерней суммирующего ряда одного из бортов.

ФМП по схеме рис. 4 может быть закомпонован в тех же габаритах и с теми же присоединительными размерами, что и ГСП, тогда оба механизма оказываются взаимозаменяемыми. ФМП по существу представляет собой планетарный реверс-редуктор с передаточным отношением  $\pm 2,25$ . Этому при данной конструкции трансмиссии соответствует значение относи-

тельного фиксированного радиуса поворота 8,51.

Принцип работы ФМП состоит в том, что для плавного регулирования скорости вращения выходного вала  $x$  используется специальная система управления включением тормозов  $T_n$  или  $T_l$ , позволяющая осуществить их регулируемое скольжение с требуемой для заданного радиуса скоростью. Таким образом, основное достоинство ГСП – бесступенчатое регулирование радиуса поворота – в этом случае сохраняется. Вместе с тем, при повороте с радиусами, близкими к расчетному, когда КПД ГСП резко снижается, ФМП работает при малых скоростях скольжения фрикционного элемента управления и его КПД приближается к единице.

Очевидными недостатками ФМП являются нагрев и износ дисков элементов управления. Однако эти явления могут быть сведены к минимуму путем рационального выбора фиксированного радиуса (возможно, не одного, а двух), числа пар трения и рабочего давления в системе управления.

Независимо от номера включенной передачи механизм поворота регулирует радиус поворота машины в пределах от бесконечности (прямолинейное движение) до 23,83 м (фиксированный радиус). При этом на обоих бортах в коробках передач включены одинаковые передачи.

Для поворота с меньшими радиусами необходимо на отстающем борту включить пониженную передачу с большим передаточным отношением. При движении на первой передаче этому режиму соответствует включение на отстающем борту остановочного тормоза, и поворот будет осуществляться вокруг остановленной гусеницы с радиусом 1,4 м независимо от работы ФМП.

На высших передачах в этом режиме вновь возможно изменение радиуса поворота за счет механизма поворота, но в более узком диапазоне. Некоторое расширение диапазона радиусов может быть получено путем поочередного регулирования пробуксовки обоих тормозов поворота ФМП. Например, при повороте вправо на четвертой передаче может быть включена на отстающем борту третья передача. Если при этом включить тормоз  $T_l$ , то радиус поворота составит 10,8 м, при включении тормоза  $T_n$  радиус уменьшается до 5,76 м.

Поворот вокруг центра тяжести невозможен.

При включении пониженной передачи на отстающем борту принципиально возможно и плавное регулирование радиуса от 24,83 м вниз до расчетных значений. Управление при этом осуществляется следующим образом. Сначала следует выключить все элементы управления в ФМП, затем включить пониженную передачу на отстающем борту (например, на правом). После этого плавно останавливать тормоз  $T_{\text{л}}$  до получения расчетного радиуса. Затем отпустить  $T_{\text{л}}$  и останавливать  $T_{\text{п}}$  вновь до получения следующего расчетного радиуса.

Однако такой режим управления может привести к разносу ФМП, потому что при включении его элементов управления резко возрастают скорости звеньев. Выполненный кинематический анализ трансмиссии показал, что в момент переключения со штатного режима управления ФМП на режим управления с пониженной передачей на отстающем борту при радиусе 23,83 м скорость левого тормоза в 4,68 превышает скорость входного звена  $\omega_0$ , то есть при  $\omega_0 = 300$  рад/с, угловая скорость тормоза составит 1404 рад/с, или

13400 об/мин. Поэтому такой режим управления вряд ли можно считать приемлемым.

Таким образом, во избежание разноса ФМП один из его элементов управления следует всегда держать под контролем, особенно при переключении передач. Так, для поворота с радиусом меньше 23,83 м следует оставить включенным соответствующий тормоз ФМП и включить пониженную передачу на отстающем борту. Машина перейдет на низший фиксированный радиус, хотя и не очень плавно, но зато безопасно для ФМП.

Основным параметром, определяющим работоспособность ФМП, является мощность буксования его элементов управления в повороте. Эта мощность зависит от радиуса поворота и свойств грунта. Расчетные значения мощности буксования тормоза поворота  $T_{\text{п}}$  и  $T_{\text{л}}$  при различных скоростях движения на четвертой передаче, а также мощности на входе ФМП даны в табл. 1 и 2.

Для поворота с радиусами меньше фиксированного  $R < 23,83$  м представляется привлекательной идея использования гидрозамед-

Таблица 1

## Мощность буксования фрикционов ФМП при различных скоростях движения на четвертой передаче, кВт

Радиус поворота $R$ , м	Относительный радиус $\rho$	Скорость движения, м/с			
		13	15	17	19
24,0	8,51	0,0	0,0	0,0	0,0
28,0	10,00	6,4	11,1	18,2	27,9
33,6	12,00	9,3	15,6	25,1	38,6
42,0	15,00	9,9	16,3	25,4	38,2
84,0	30,00	7,0	10,9	16,2	23,2
140,0	50,00	4,6	7,2	10,5	14,9
280,0	100,00	2,5	3,9	5,6	7,9
560,0	200,00	1,3	2,0	2,9	4,1

Таблица 2

## Мощность на входе в ФМП при различных скоростях движения на четвертой передаче, кВт

Радиус поворота $R$ , м	Относительный радиус $\rho$	Скорость движения, м/с			
		13	15	17	19
24,0	8,51	58,0	103,0	167,7	262,5
28,0	10,00	43,3	74,6	122,4	187,8
33,6	12,00	32,0	53,9	86,3	132,9
42,0	15,00	22,9	37,7	58,8	88,4
84,0	30,00	9,7	15,2	22,6	32,4
140,0	50,00	5,6	8,7	12,7	17,9
280,0	100,00	2,8	4,2	6,2	8,6
560,0	200,00	1,4	2,1	3,1	4,3

лителя на отстающем борту с выключением всех элементов управления ФМП. Поскольку в этом случае через ФМП поток мощности не проходит, механизм поворота работает как простой дифференциал. Однако в случае недозаполнения гидрозамедлителя такой режим работы может привести к перегреву и разрушению ФМП.

Увеличение ресурса ФМП может быть достигнуто за счет применения двухступенчатого механизма, позволяющего получить два расчетных радиуса поворота и оптимизировать распределение работы буксования между элементами управления.

Для определения передаточного числа первой ступени задается величина  $\rho_{\phi 1}$  фиксированного относительного радиуса поворота. При решении задачи оптимизации разбивки передаточных чисел ступеней ФМП, исходя из опыта, полученного при разработке одноступенчатого ФМП, было задано  $\rho_{\phi 1} = 4,0$ . Этому соответствует значение передаточного числа первой ступени  $i_{\text{ФМП1}} = 1,507$ .

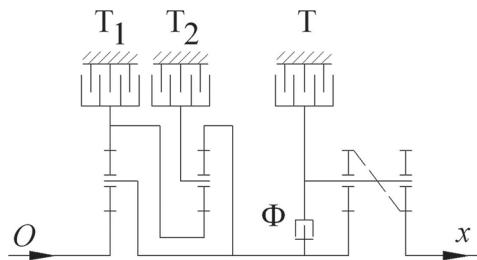
Для определения  $\rho_{\phi 2}$  рассматривается диапазон изменения относительных радиусов от  $\rho_{kp1}$  (относительный радиус поворота, ограничивающий область частичного заноса) до  $\rho_{cb}$  (относительный радиус свободного поворота). В ходе расчетов использовался метод случайногоперебора. Для каждой ступени определялась величина  $N^*_s = N_s \cdot f(\rho)$  (кВт), где  $f(\rho)$  – плотность вероятности поворота машины с заданным относительным радиусом [5].

Критерием оптимизации является локальный минимум функционала

$$G(\rho_{\phi 1}, \rho_{\phi 2}) = \int_{\rho_{\phi 1}}^{\rho_{\phi 2}} N_{s1}^* d\rho + \int_{\rho_{\phi 2}}^{\rho_{cb}} N_{s2}^* d\rho \rightarrow \min,$$

где  $N_{s1}^*$  и  $N_{s2}^*$  – величины, определяемые раздельно для первой и второй ступеней ФМП. Локальный минимум имеет место при значении параметра  $\rho_{\phi 2} = 12,1$ . Этой величине соответствует значение  $i_{\text{ФМП2}} = 7,605$ .

Из нескольких рассмотренных схем механизмов, позволяющих обеспечить необходимые режимы работы, был выбран вариант, позволяющий реализовать принцип контроля над буксованием дисков элементов управления, компактный и достаточно простой для реализации. Схема двухступенчатого ФМП с планетарным реверсом показана на рис. 5.



**Рис. 5. Кинематическая схема двухступенчатого ФМП с планетарным реверсом:**

*O и x – ведущее и ведомое звенья; T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub> – тормоза первой и второй ступеней; T и Ф – тормоз и фрикцион реверса*

Планетарный редуктор ФМП с двумя тормозными элементами управления T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub> реализует два режима работы. Направление вращения выходного вала можно изменять путем включения в схеме планетарного механизма реверса тормоза T или блокирующего фрикциона Ф с гидростатическим управлением.

Тормоза T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub> при получении радиусов поворота больших расчетного работают в режиме управляемого буксования дисков.

Ожидаемые недостатки двухступенчатого ФМП по сравнению с одноступенчатым:

- увеличение числа деталей (следовательно, усложнение конструкции, снижение надежности, рост стоимости изделия и др.);
- большие сложности при компоновке ФМП в габаритах ГСП (хотя, по первичной оценке, варианты конкурентоспособны).

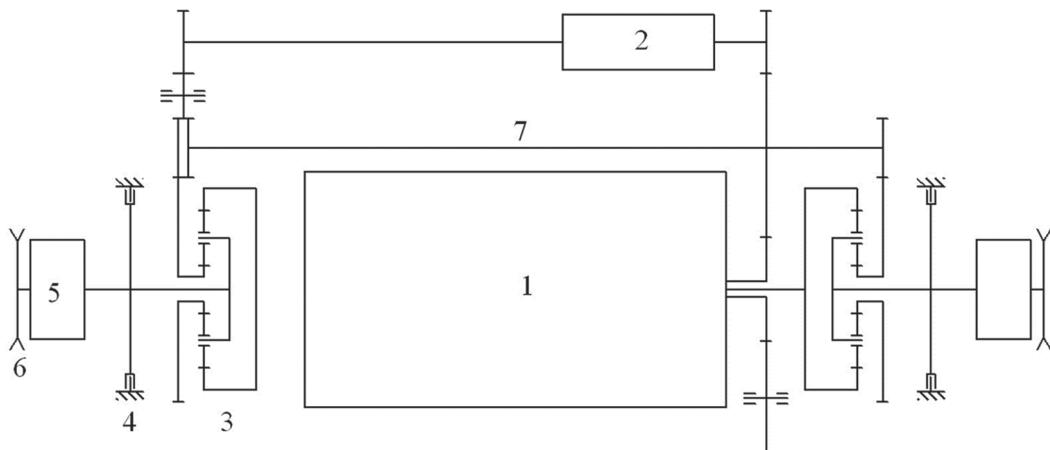
Сравнительные достоинства двухступенчатого ФМП:

- меньший ожидаемый износ дисков элементов управления;
- отсутствие скачкообразных переходов (рывков) радиуса поворота при переключении элементов управления.

Алгоритмы управления, элементная база схемы управления для обоих вариантов ФМП с точки зрения сложности, надежности и стоимости материальной части существенно различаться не будут.

Принцип замены ГСП фрикционным механизмом распространяется и на случай трансмиссии с центральной коробкой передач (рис. 6).

Нагрузки на ГСП при такой схеме включения увеличиваются по сравнению с решением, показанным на рис. 1. Это обусловит увеличение габаритов ГСП. В принципе, в габари-



**Рис. 6. Схема двухпоточной трансмиссии с центральной коробкой передач:**

1 – центральная коробка передач; 2 – ГСП, ФМП или ЭМ; 3 – суммирующий планетарный ряд; 4 – остановочный тормоз борта; 5 – бортовая передача; 6 – ведущее колесо борта; 7 – межбортовая связь

таках ГСП в этом случае может быть реализован трехступенчатый ФМП. Первая ступень будет позволять осуществлять поворот машины вокруг центра тяжести ( $\rho_{\phi 1} = 0$ ). По аналогии с двухступенчатым ФМП вторая ступень обеспечивает поворот с относительным радиусом  $\rho_{\phi 2} = 4$ . При выборе значения  $\rho_{\phi 3}$  можно применить описанный выше принцип минимизации функционала  $G(0, 4, \rho_{\phi 3}) \rightarrow \min$ .

Представляется, что в случае применения схемы с центральной коробкой передач (рис. 6), мощность буксования элемента управления ФМП увеличивается по сравнению с конструкцией, использующей бортовые коробки передач.

Для обеих схем значение  $u_0 = -1$ . Таким образом, для одной и той же машины при одних и тех же внешних условиях

$$N_s = f(\omega_{\phi 1} - \omega_1) = f(u_\phi).$$

Действительно:  $\omega_{\phi 1} = 2\omega_{np}/(u_\phi + 1)$ . Следовательно, с ростом  $u_\phi$  скорость скольжения при неизменной скорости борта будет падать, а мощность буксования уменьшаться.

Для схемы с бортовыми коробками передач:

$$u_\phi = \frac{u_{FMP}^* - k}{-u_{FMP}^* - k},$$

где  $u_{FMP}^*$  – передаточное число ступени ФМП, приведенное к солнечной шестерне суммирующего ряда (с учетом передаточных чисел зубчатых передач параллельного потока мощности);

$k < 1$  – кинематический параметр суммирующего ряда.

При наличии центральной коробки передач

$$u_\phi = \frac{u_{FMP}^* - ku_{kp}}{-u_{FMP}^* - ku_{kp}},$$

где  $u_{kp}$  – передаточное число коробки передач.

В реальной трансмиссии для этих случаев величины  $u_{FMP}^*$  будут различаться, но для сравнения вариантов полагаем данные величины равными. При таком предположении при  $u_{kp} = 1$  (прямая передача) расчетные формулы для определения величины  $u_\phi$  для обоих вариантов трансмиссии совпадут. В прочих же случаях с ростом  $u_{kp}$  величина  $u_\phi$  будет снижаться. А значит, на низших передачах при схеме с центральной коробкой передач мощность буксования на элементе управления ФМП будет расти, и агрегат будет работать в более тяжелых условиях.

Тем не менее, ФМП остается альтернативой применению ГСП в первую очередь потому, что производство отечественных ГСП с необходимыми характеристиками, способных работать в условиях плотной компоновки моторно-трансмиссионного отделения не налажено. Дальнейший интерес представляет интеграция ФМП в состав двухпоточного механизма поворота с нелинейной зависимостью расчетных радиусов от скорости движения машины (или от частоты вращения выходного вала коробки передач) [8].

## Заключение

1. Положительный опыт испытаний одноступенчатого ФМП подтверждает возможность реализации такого механизма в условиях плотной компоновки трансмиссионного отделения. ФМП, в принципе, способен заменить гидростатическую передачу в составе механизма поворота.

2. Ожидаемым преимуществом многоступенчатых ФМП является увеличение ресурса за счет оптимизации износа пакетов дисков элементов управления.

3. Рост мощности, проходящей через поток, в котором расположен ФМП, требует перехода от одноступенчатого механизма к многоступенчатому, что позволит при малом увеличении габаритов повысить ресурс дисковых элементов управления.

4. При использовании бортовых коробок передач ожидается, что мощность, рассеиваемая на ФМП, установленном в параллельном потоке мощности, окажется ниже, чем в случае применения трансмиссии с центральной коробкой передач.

## Литература

1. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. М.: Машиностроение, 1975. 448 с.
2. Носов Н.А. и др. Расчет и конструирование гусеничных машин: Учебник для вузов / под ред. Носова Н.А. Л: Машиностроение, 1972. 559 с.
3. Галышев Ю.В., Добрецов Р.Ю., Поршнев Г.П., Худорожков С.И. Исследования и разработки ученых СПбГПУ в области оборонной техники (по материалам IX-й международной выставки вооружения, военной техники и боеприпасов) // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование», 2014. № 1. С. 26–32.
4. Шеломов В.Б., Добрецов Р.Ю. Мощности двигателя и буксования фрикционного элемента управления поворотом гусеничной машины // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование». 2010. № 2. Т. 2. С. 87–91.
5. Добрецов Р.Ю. Учет энергетических параметров механизмов поворота при комплексной оценке потерь мощности в шасси транспортных гусеничных машин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Серия «Наука и образование», 2011. № 1. С. 122–128.
6. Добрецов Р.Ю. Объективная оценка технических характеристик шасси транспортных гусеничных машин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2011. № 2. С. 19–23.
7. Теория и конструкция танка. Т.8. Параметры внешней среды, используемые при расчете танков. М.: Машиностроение, 1987.
8. Демидов Н.Н. и др. Транспортные гусеничные машины: механизмы поворота с нелинейной характеристикой // Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 5-й Международной научно-практической конференции; под ред. А.Н. Евграфова и А.А. Поповича. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 1445 с. С. 898–912.

## References

1. Zabavnikov N.A. Osnovy teorii transportnykh gusenichnykh mashin [Fundamentals of the theory of transport tracked vehicles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 448 p. (in Russ.).
2. Raschet i konstruirovaniye gusenichnykh mashin [Calculation and design of caterpillar vehicles]: Textbook for high schools / Nosov N.A., etc.; Ed. Nosov N.A. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 559 p. (in Russ.).
3. Yu.V. Galishev, R.Yu. Dobretsov, G.P. Porshnev, S.I. Hoodorozhkov. Issledovaniya i razrabotki uchenykh SPbGPU v oblasti oboronnoj tekhniki (po materialam IX-je mezhdunarodnoj vystavki vooruzheniya, voennoj tekhniki i boepripasov) [Research and development of SPBstu scientists in defense technique (based on the IX international exhibition of arms, military equipment and ammunition)]. Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Seriya Nauka i obrazovanie, 2014, no. 1, pp. 26–32 (in Russ.).
4. Shelomov V.B., Dobretsov R.Yu. Moshchnosti dvigatelya i buksovaniya friktionnogo elementa upravleniya poverotom gusenichnoy mashiny [Engine power and friction management element slipping power of steering of tracked vehicle]. Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Seriya: Nauka i obrazovaniye, 2010, no. 2, vol. 2, pp. 87–91 (in Russ.).
5. Dobretsov R.Yu. Uchet energeticheskikh parametrov mehanizmov poverota pri kompleksnoy otsenke poter moshchnosti v shassi transportnykh gusenichnykh mashin [Accounting of power parameters of steering devices at a complex loss estimate of power in chassis of transport tracked vehicles]. Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Seriya: Nauka i obrazovaniye, 2011, no. 1. pp. 122–128 (in Russ.).
6. Dobretsov, R.Yu. Objektivnaia otsenka tekhnicheskikh kharakteristik shassi transportnykh gusenichnykh mashin [Objective assessment of technical characteristics of the chassis of transport tracked ve-

- hicles]. Traktory i sel'skokhoziaistvennye mashiny, 2011, no. 2, pp. 19–23 (in Russ.).
7. Teoriya i konstruktsiya tanka. T.8. Parametry vneshney sredy, ispolzuyemye pri raschete tankov [Theory and design of the tank. Volume 8. Parameters of the environment used in the calculation of tanks.]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1987 (in Russ.)
8. Transportnye gusenichnye mashiny: mekhanizmy poverota s nelinejnoj kharakteristikoj [Transport tracked vehicles: steering devices with nonlinear characteristic]. Demidov N.N., etc. Sovremennoe mashinostroenie: Nauka i obrazovanie: materialy 5-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. Ed. A.N. Evgrafov and A.A. Popovich. Saint-Petersburg, Polytechnic University Publ., 2016, p. 1445, pp. 898–912 (in Russ.).

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ БОКОВОМУ УВОДУ ШИН ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ КАЧЕСТВ МТА

## DETERMINATION OF LATERAL TIRE DRAG COEFFICIENTS TO ACHIEVE THE REQUIRED PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF MACHINE-TRACTOR UNIT

Н.В. СЕРГЕЕВ<sup>1</sup>, к.т.н.  
С.Е. СЕНЬКЕВИЧ<sup>2</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup> Азово-Черноморский инженерный институт – филиал ФГБОУ ВО Донской ГАУ

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение «Федеральный научный агринженерный центр ВИМ»

N.V. SERGEEV<sup>1</sup>, PhD in Engineering  
S.E. SEN'KEVICH<sup>2</sup>, PhD in Engineering

<sup>1</sup> Azov-Black Sea Engineering Institute of Donskoy State Agrarian University, Zernograd, Russia, sergeev-n.v@mail.ru

<sup>2</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia, sergej\_senkevich@mail.ru

В статье рассматривается возможность определения путем аналитических расчетов таких показателей коэффициентов сопротивления боковому уводу пневматических шин передних и задних колес трактора, при которых будут обеспечены приемлемые тяговые показатели трактора, требуемые эксплуатационные качества агрегата и заданное траекторное движение агрегата. Разработанная М.В. Келдышем теория качения пневматического колеса дает наиболее соответствующую модель бокового увода. При неустановившемся боковом уводе центр контактного отпечатка описывает траекторию, называемую линией качения шины. Если скольжения нет, то средняя линия протектора в пределах контактной площадки совпадает с линией качения. То есть в окрестностях центра площадки его абсолютная скорость и угловая скорость данной окрестности равны нулю, а кривизна этих совпадающих линий определяется боковой и угловой деформациями шины. Для практической реализации принятых расчетных моделей шины необходимо в уравнениях определить соотношение коэффициентов кривизны и величину функции проскальзывания. Приводятся экспериментальные исследования пропашного агрегата с блокированной навеской культиватора.

**Ключевые слова:** агрегат, устойчивость, тяговый КПД.

This article considers the possibility of determining by analytical calculations such indicators of the drag coefficients for lateral removal of the pneumatic tires of the front and rear wheels of a tractor, at which acceptable traction characteristics of the tractor, the required performance of the unit and the provision of a given trajectory movement of the unit will be provided. Developed by Mstislav Keldysh theory of the rolling of a pneumatic wheel gives the most appropriate model of lateral slip. With an unsteady lateral slip, the center of the contact imprint describes a trajectory called the tire rolling line. If there is no slip, the middle line of the tread within the contact area, coincides with the rolling line. So in the vicinity of the center of the site, its absolute speed and angular velocity of this area equals zero. And the curvature of these coincident lines is determined by the lateral and angular deformations of the tire. For the practical implementation of the adopted design models of the tire, it is necessary in the equations to determine the ratio of the curvature coefficients and the magnitude of the slip function. Experimental studies of a tilled unit with a blocked cultivator sample are given.

**Keywords:** unit, stability, traction efficiency.

## Введение

Движение машинно-тракторного агрегата при выполнении полевых работ происходит по криволинейным траекториям. Такое движение обусловлено внешними воздействиями – управляющими и возмущающими. Для агрегатов с колесными тракторами класса 1,4 управляющим воздействием является угол поворота направляющих колес  $\theta$ , возмущающим – отклоняющий момент от машины-орудия  $M$ . При этом качение колес трактора происходит с боковым уводом шин, вследствие чего рабочие органы машины-орудия могут получить недопустимые, по условиям технологической операции, отклонения в боковом направлении, а тяговые показатели ведущих колес трактора существенно снижаются.

## Цель исследования

Определить аналитическими расчетами, какие значения коэффициентов сопротивления боковому уводу шин трактора необходимы для достижения требуемых эксплуатационных качеств агрегата и сохранения заданной точности тракторного движения при приемлемых тяговых показателях.

## Методы и средства проведения исследований

Потребность расчета показателей управляемости и курсовой устойчивости колесных тракторов диктует необходимость выбора достаточно точной и, одновременно, простой расчетной модели бокового увода шин. Таким требованиям удовлетворяет модель первого порядка [1]:

$$\left. \begin{aligned} \xi + v \cdot \frac{a_1}{a_2} \cdot (1 + f_{\text{пр}}) \cdot \xi &= -\gamma \\ \theta = \frac{\gamma}{v} \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

И безынерционная модель увода:

$$\theta = -\frac{Y}{(1 + f_{\text{пр}}) \cdot K_y}, \quad (2)$$

где  $\xi$  – боковая деформация шины (рис. 1);  $\gamma$  – поперечная составляющая скорости центра колеса;  $\theta$  – угол бокового увода шины;  $v$  – скорость движения колеса;  $Y$  – боковая реакция опорного основания;  $K_y$  – коэффициент сопротивления боковому уводу;  $a_1/a_2$  – коэффици-

енты кривизны средней линии шины в центре контактного отпечатка;  $f_{\text{пр}}$  – функция проскальзывания отпечатка.

В ряде случаев безынерционная модель может оказаться более предпочтительной по следующим соображениям. При боковом уводе крупногабаритной широкого профиля шины в контактном отпечатке происходят настолько сложные физические процессы, связанные со скольжением в разных направлениях отдельных элементов отпечатка, что математически описать их пока не представляется возможным. Кроме того, у рассматриваемых шин продольная ось контактного эллипса меньше поперечной. Это значит, что в переходных процессах при изменении боковых сил показатели бокового увода близки к установленным предельно возможным значениям вследствие быстрого, из-за относительно малой длины, контактного отпечатка протекания процессов.

При боковом уводе на сминаемом фунте скольжение отдельных элементов и даже всего контактного отпечатка начинается уже при небольших, близких к нулю, углах увода, отчего все необходимые факторы при математическом моделировании увода учесть чрезвычайно

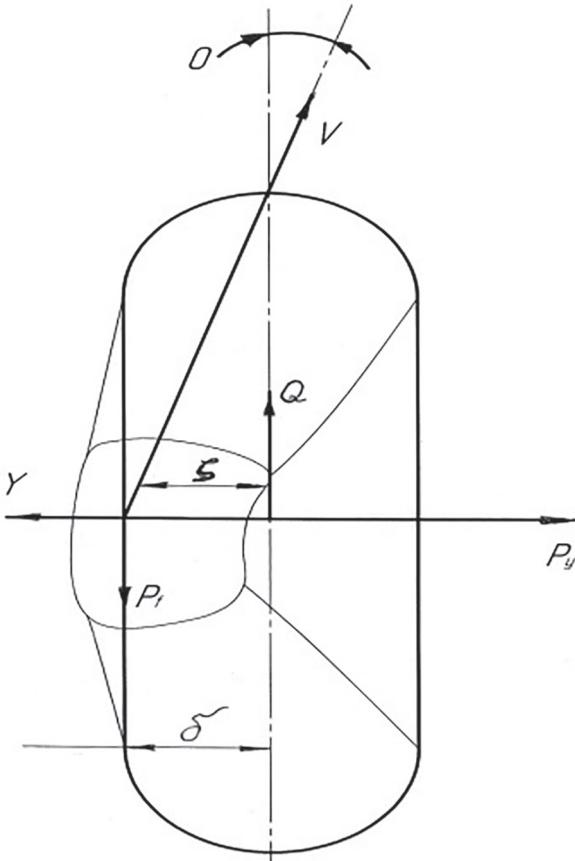


Рис. 1. Схема бокового увода шины

трудно. По этим причинам усложнение модели бокового увода шины, которое дает несущественное повышение точности, для практических расчетов нельзя признать целесообразным.

Для практической реализации принятых расчетных моделей шины необходимо в уравнениях (1) и (2) определить соотношение коэффициентов кривизны  $a_1/a_2$  и величину функции проскальзывания  $f_{\text{пр}}$ . Такая задача решается просто, если учесть, что  $a_1/a_2 = Ky/C_\xi$ , где  $C_\xi$  – боковая жесткость шины, а функцию проскальзывания выразить в зависимости от коэффициента касательной нагрузки [1]:

$$\psi = \frac{Y}{\varphi_y \cdot Q}, \quad (3)$$

где  $\varphi_y$  – коэффициент бокового сцепления колеса с опорным основанием;  $Q$  – вертикальная нагрузка на колесо.

Вид функции проскальзывания определяется для данной шины значениями коэффициента касательной нагрузки и не зависит от внутреннего давления воздуха и вертикальной нагрузки на колесо, что удобно при практических расчетах.

В качестве примера приведем данные, полученные для тракторных шин Ф-81 и Ф-85. После их испытаний на шинном тестере построены характеристики  $P_y(\theta)$ ,  $P_y(\xi)$ , на основе которых определены зависимости  $f_{\text{пр}}(\psi)$  (рис. 2).

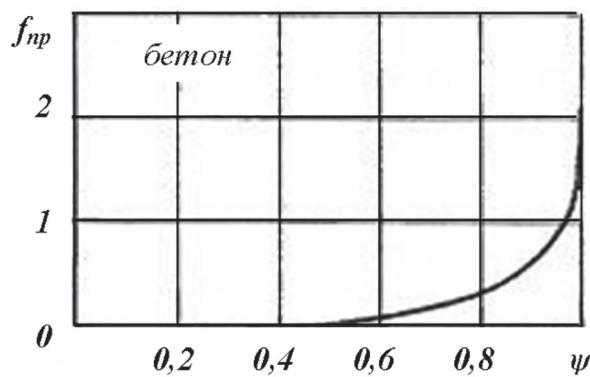


Рис. 2. График функций проскальзывания для шин Ф-81 и Ф-85 на бетоне

Использование этих зависимостей при расчетах показателей бокового увода удобно тем, что теперь уже не требуется экспериментального определения характеристик  $P_y(\theta)$  для разных значений внутреннего давления воздуха и вертикальной нагрузки на колесо.

Запишем уравнения траекторного движения для агрегата с навесной машиной (культиватор, сеялка) в следующем виде:

$$\begin{cases} u + Au + B\omega = e_1\theta, \\ \omega + \Delta_\omega - C_u = e_1\theta + e_2M, \\ y = U - V\varphi, \\ \varphi = \omega. \end{cases} \quad (4)$$

где  $y$  и  $\varphi$  – отклонение от заданной траектории, соответственно, линейное центра инерции агрегата и угловое остила трактора;  $V$ ,  $U$ ,  $\omega$  – скорость, соответственно, поступательная, боковая центра инерции и угловая остила трактора;  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $\Delta$ ,  $e_1$ ,  $e_2$  – постоянные коэффициенты, зависящие от параметров агрегата (координат центра инерции, массы и т.д.) и коэффициентов сопротивления боковому уводу колес трактора.

Далее осуществляем переход к тем показателям, которые и определяют искомые эксплуатационные качества агрегата, то есть к боковому отклонению рабочих органов машины-орудия  $Y_p$  и углу бокового увода ведущих колес трактора  $\alpha_b$ :

$$\begin{cases} Y_p = U - l_p\omega - V\varphi, \\ \alpha_b = \frac{U - b\omega}{V}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $l_p$  и  $b$  – координаты рабочего агрегата и ведущих колес относительно центра инерции агрегата.

Согласно уравнениям (4) и (5), запишем передаточные функции для названных показателей, считая входными воздействиями  $\theta$  и  $M$ :

$$\begin{cases} W_M^{Y_p}(p) = \frac{B_1 p^3 + B_2 p^2 + B_3 p + B_4}{A_1 p^{3+} A_2 p^3 + A_3 p^2 + A_4 p + A_5}, \\ W_0^{Y_p}(p) = \frac{C_1 p^3 + C_2 p^2 + C_3 p + C_4}{A_1 p^{3+} A_2 p^3 + A_3 p^2 + A_4 p + A_5}, \\ W_M^{\alpha_b}(p) = \frac{B_1^1 p + B_2^1}{A_1^1 p^2 + A_2^1 p + A_3}, \\ W_0^{\alpha_b}(p) = \frac{C_1^1 p + C_2^1}{A_1^1 p^2 + A_2^1 p + A_3}, \end{cases} \quad (6)$$

где  $p = \frac{d}{dt}$  – оператор дифференцирования.

## Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментальные исследования пропашного агрегата с блокированной навеской культиватора показали, что внешние воздействия и выходные показатели криволинейного движения представляют собой случайные процессы, близкие к стационарным и центрированным. Среднеквадратичные значения этих показателей представлены в табл. 1, а их нормированные спектральные плотности – на рис. 3.

Цифрами со штрихами обозначен вариант агрегата с увеличенным в 1,8 раза коэффициентом сопротивления уводу управляемых колес трактора.

Приведенные данные показывают, что величина линейного отклонения центра инерции равна 6–7 см, то есть примерно постоянна и не зависит от изменения параметров агрегата.

Это можно объяснить тем, что линейное отклонение является собственно ошибкой водителя при корректировке траектории.

Данные также свидетельствуют о том, что между управляющим и возмущающим воздействиями корреляционная связь слабо выражена. Коэффициент корреляции не превышает 0,1. Исходя из этого спектральную плотность определяемых показателей находим по известным зависимостям [2]:

$$\begin{aligned} S_{y_p}(\omega) &= |W_m^{y_p}(j\omega)|^2 \cdot S_m(\omega) + \\ &+ |W_\theta^{y_p}(j\omega)|^2 \cdot S_\theta(\omega) \\ S_{\alpha_b}(\omega) &= |W_m^{\alpha_b}(j\omega)|^2 \cdot S_m(\omega) + \\ &+ |W_\theta^{\alpha_b}(j\omega)|^2 \cdot S_\theta(\omega). \end{aligned} \quad (7)$$

Таблица 1

Среднеквадратичные значения показателей криволинейного движения агрегата

Среднеквадратичное отклонение	Значение $a$ при различной скорости движения			
	$P_{kp} = 6,2$ кН		$P_{kp} = 9,1$ кН	
	1,82 м/сек	2,45 м/сек	3,58 м/сек	2,12 м/сек
$\sigma_y$ , см	$\frac{6,4}{7,0}$	$\frac{5,9}{6,2} \left( \frac{5,8}{5,8} \right)$	$\frac{6,1}{5,8}$	$\frac{6,3}{5,9}$
$\sigma_\phi$ , град	$\frac{0,65}{0,57}$	$\frac{0,62}{0,52} \left( \frac{0,59}{0,48} \right)$	$\frac{0,78}{0,68}$	$\frac{1,03}{0,74}$
$\sigma_\theta$ , град	$\frac{1,21}{0,96}$	$\frac{1,15}{1,03} \left( \frac{1,08}{0,88} \right)$	$\frac{1,48}{1,08}$	$\frac{2,13}{1,57}$
$\sigma_M$ , кНм	0,94	1,18	1,23	1,17

Примечание: в знаменателе – при увеличенном в 1,85 сопротивлении уводу передних колес, в скобах – при включенном ГСВ.

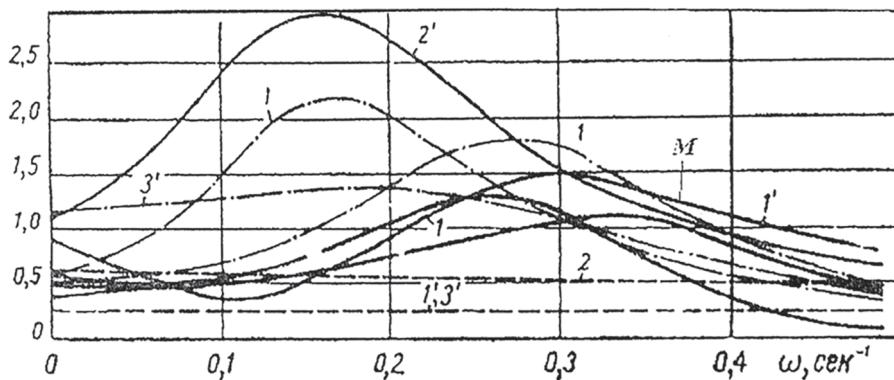


Рис. 3. Нормированные спектральные плотности углового (1), линейного (2) отклонений и управляющего (3), возмущающего (M) воздействий

Спектральные плотности воздействий на основании рис. 1 могут быть записаны в виде:

$$S_m(\omega) = \frac{q_m \cdot D_m \cdot V}{(\omega^2 + \beta^2 \cdot V^2)},$$

$$S_\theta(\omega) = \frac{q_\theta \cdot D_\theta \cdot V}{(\omega^2 + \gamma^2 \cdot V^2)}, \quad (8)$$

где  $D_m$ ,  $D_\theta$  – дисперсии возмущающего и управляемого воздействий.

Таким образом, задаваясь разными значениями коэффициентов сопротивления боковому уводу колес трактора, которые в выражениях для остаются неизвестными, вычисляем дисперсии искомых показателей  $Y_p$  и  $\alpha_b$  [1].

$$\begin{cases} D_{Y_p} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{Y_p}(\omega) d\omega \leq [D_{Y_p}] \\ D_{\alpha_b} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\alpha_b}(\omega) d\omega \leq [D_{\alpha_b}] \end{cases} \quad (9)$$

Принимаем те практически реализуемые значения коэффициентов сопротивления уводу, при которых выполняются условия (9).

## Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что на управляемость особенно заметно оказывают влияние коэффициенты сопротивления уводу передних и задних колес трактора. Так, при увеличении тягового сопротивления  $P_{kp}$  значения углового отклонения и управляемого воздействия возрастают на 40–70 % [4]. Это происходит вследствие уменьшения коэффициентов сопротивления уводу колес трактора: передних – из-за добавочной их разгрузки, задних – от увеличения буксования. Угловое отклонение, зависящие уже не только от квалификации водителя, но и от чувствительности агрегата к внешним воздействиям, значительно изменяется при изменении

параметров агрегата [5]. В итоге снижаются и тяговые показатели трактора.

## Литература

- Хачатуров А.А., Афанасьев В.Л., Васильев В.С. и др. Динамика системы дорога – шина – водитель / М.: Машиностроение, 1976. 535 с.
- Юревич Е.И., Юревич Е.И. Теория автоматического управления. М.: Энергия, 1969. 375 с.
- Ганькин Ю.А. Моделирование управляемого движения машинно-тракторного агрегата / Ю.А. Ганькин. М.: Изд-во МСХА, 1994. 84 с.
- Яровой В.Г., Сергеев Н.В. Снижение энергозатрат при работе пропашного трактора: монография. Зерноград: ФГБОУ ВПО АЧГАА, 2012. 103 с.
- Иванцов В.Д. Динамика и курсовая устойчивость машинно-тракторного агрегата: монография. Волгоград: ВолгГТУ РПК «Политехник», 2007. 163 с.

## References

- Hachaturov A.A., Afanas'ev V.L., Vasil'ev V.S. Dinamika sistemy doroga – shina – voditel' [Dynamics of the road-tire-driver system]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1976. 535 p.
- YUrevich E.I. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Automatic control theory]. Moscow: EHnergiya Publ., 1969. 375 p.
- Gan'kin YU.A. Modelirovaniye upravlyayemogo dvizheniya mashinno-traktornogo agregata [Simulation of the controlled movement of the machine-tractor unit]. Moscow: Izd-vo MSKHA Publ., 1994. 84 p.
- YAravoij V.G., Sergeev N.V. Snizhenie ehnergozatrata pri rabote propashnogo traktora [Reduction of energy consumption during the operation of a tilled tractor]. Zernograd: FGBOU VPO ACHGAA Publ., 2012. 103 p.
- Ivantov V.D. Dinamika i kursovaya ustojchivost' mashinno-traktornogo agregata [Dynamics and course stability of the machine-tractor unit]. Volgograd: VolgGTU RPK «Politehnika» Publ., 2007. 163 p.

# СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БЕЛКОВЫХ КОМБИКОРМОВ

## SYSTEM STUDIES OF THE PREPARATION OF PROTEIN FEED

И.Е. ПРИПОРОВ, к.т.н.

Кубанский государственный аграрный университет  
имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия,  
ya.krip10@ya.ru

I.E. PRIPOROV, PhD in Engineering

Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia,  
ya.krip10@ya.ru

Цель исследования – определить направление развития системных исследований приготовления белкового комбикорма. Системный анализ приготовления белкового комбикорма проводится методом разделения системы на подсистемы разного уровня (технологические линии) и элементы (технические устройства), что позволяет наметить этапы проведения исследований и построить их классификацию. В научной системной теории пойдем по пути «точной технологии животноводства», которую рассматривал академик Л.П. Кормановский. Технология построена на основе математических моделей, полученных в результате теоретических исследований (анализа) и экспериментально (эмпирически). В свою очередь, «точная технология животноводства» должна базироваться на технических системах математической модели и конкретных технических разработках устройств и технологий приготовления белкового комбикорма. Для приготовления белкового корма в сыпучем и гранулированном видах с целью снижения энергоемкости процесса и повышения его качества были разработаны линия его осуществления (патент № 2646092) и способ (патент № 2636480). Приведены устройство и технологический процесс работы линии. Разработана система приготовления белкового корма на основе общей теории систем. Анализ в данной области показал отсутствие системных исследований приготовления белкового комбикорма на основе общей теории системы применительно к «точной технологии животноводства», а именно в «точной технологии приготовления белкового комбикорма» с помощью мультимедийного устройства, контролирующего технологический процесс. Поэтому необходимо разработать математическую модель на базе теории общей системы применительно к точной технологии приготовления белкового комбикорма. Разработанная математическая модель позволила повысить пищевую ценность белковых комбикормов, а также расширить их ассортимент для кормления крупного рогатого скота, а именно: для каждого вида сельскохозяйственного животного с его физиологической особенностью и потребностью в них, и улучшить экологию окружающей среды.

**Ключевые слова:** белковый комбикорм, сельскохозяйственные животные, системные исследования, точная технология приготовления, точная технология животноводства, общая теория системы, пищевая ценность корма.

The purpose of the study is to determine the direction of development of system studies of the preparation of protein feed. System analysis of the preparation of protein feed is carried out by dividing the system into subsystems of different levels (process lines) and elements (technical devices), which will allow to outline the stages of research and to construct their classification. In the scientific systems theory, we will follow the path of «exact technology of animal husbandry», which was considered by academician Leonid Kormanovsky, built on the basis of mathematical models obtained as a result of theoretical studies (analysis) and experimentally (empirically). In turn, the "exact technology of animal husbandry" should be based on the technical systems of the mathematical model and specific technical developments of devices and technologies for the preparation of protein feed. For the preparation of protein feed in the free running and granular types in order to reduce the energy intensity of the process and improve its quality, the line for its implementation under patent No. 2646092 and the method according to patent No. 2636480 were developed. The design and technological process of its work are given. A system for the preparation of protein feed was developed on the basis of the general theory of systems. The analysis in this area showed the absence of systemic studies on the preparation of protein feed based on the general theory of the system as applied to «accurate technology of animal husbandry», namely, in «accurate technology of preparation of protein feed» using a multimedia device that controls the process. Therefore, it is necessary to develop a mathematical model based on the theory of the general system with respect to the exact technology of preparation of protein feed. The developed mathematical model allowed to increase the nutritional value of protein feed, as well as to expand their range for feeding cattle, namely for each species of agricultural animal with its physiological peculiarity and need for them, and to improve the environment ecology.

**Keywords:** protein feed, farm animals, system research, accurate preparation technology, precise animal husbandry technology, general system theory, nutritional value of feed.

## Введение

В системный анализ входят модели и методы принятия решений. В общем виде последовательность принятия решений состоит из нескольких этапов: выявление проблемной ситуации, целевыявление, формирование критериев выбора решений, выработка решений, согласование, выбор и реализация решений, а также оценка полученных результатов. Данная последовательность применяется для создания разных сложных систем, к которым относятся методы принятия решений. Методы не привязаны к объекту проектирования, в них делается акцент на способы организации группового или индивидуального поиска решений, которым относятся методы (активизации мышления, например мозговой штурм, синектика; генерации вариантов; выбора, например метод экспертных оценок) и модели (выбор оптимальных альтернатив и исследования операций).

Компонентом системного анализа является технология проектирования, использующая системный анализ, ориентирующаяся на конкретный вид систем (технологии автоматизированного проектирования технических систем различного назначения). Отличительной особенностью их является наличие регламентирующей процедуры проектирования, предусматривающей выполнение определенных этапов, для каждого из которых имеются стандартизованные методики и стандартный набор документации, а иногда на некоторых этапах предусматривается формирование разного рода моделей.

Любая технология использует системный подход к проектированию, в основе которого лежит системная последовательность принятия решений. Методики проектирования базируются на различных методологиях системного анализа и общих процедурах принятия решений [33].

Системный анализ учитывается при случайному характере воздействия машин в технологической линии на материал, функции распределения и их изменение от этих воздействий описываются логарифмически нормальным законом. Стохастический характер воздействия каждой машины на частицы материала при выполнении технологического процесса требует определенного подхода к реализации принципа системной стратегии приготовления комбикормов, выражющейся в том, что каждая последующая операция не должна ухудшать качество выполненных работ [22].

Как известно, системный подход представляет собой совокупность методов и средств, позволяющих исследовать свойства, структуру, функции объектов, явлений или процессов в целом, представив их в качестве систем со всеми сложными межэлементными взаимосвязями, взаимовлиянием элементов на систему и на окружающую среду, а также влияние самой системы на ее структурные элементы. Системный подход при исследовании сложного объекта, явления или процесса базируется на его целостном видении [22].

## Цель исследования

Определить направление развития системных исследований приготовления белкового комбикорма.

## Материал и методика исследования

Системный анализ [22] приготовления белкового комбикорма проводится методом разделения системы на подсистемы разного уровня (технологические линии) и элементы (технические устройства), что позволит наметить этапы проведения исследований и построить их классификацию (рис. 1).

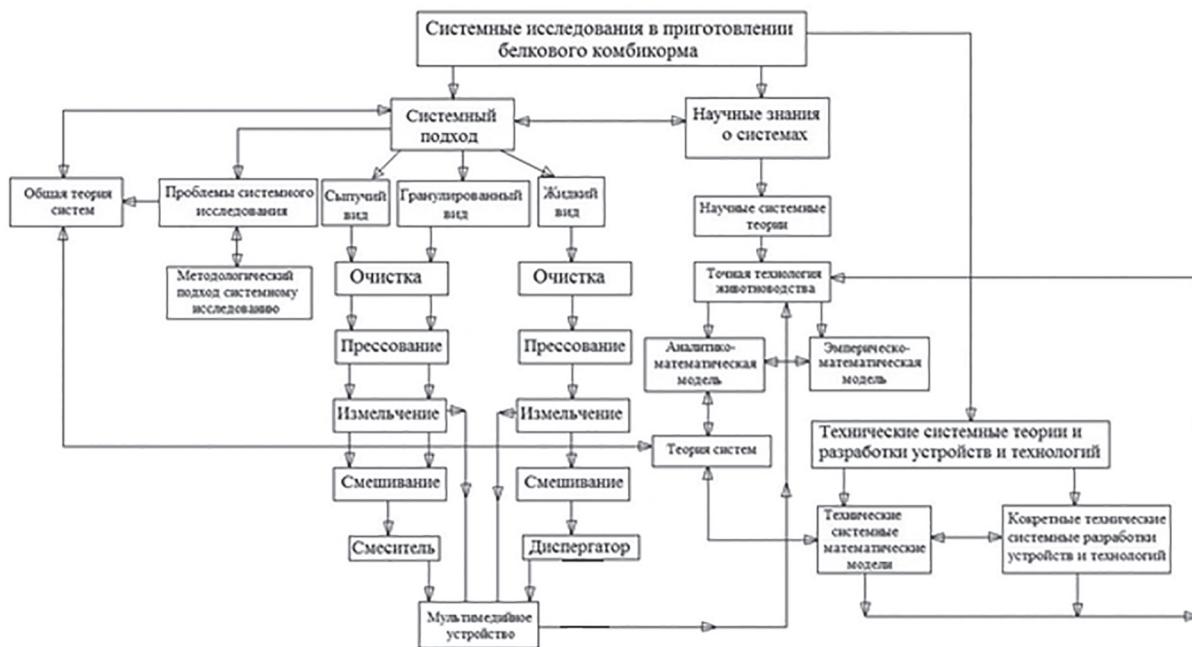
Предложенная на рис. 1 классификация системных исследований представляет собой однонаправленные линии, выражющие отношение разделения соответствующих их областей [1] по приготовлению белкового комбикорма для сельскохозяйственных животных на частные области, относящиеся к первой группе, а двунаправленные линии выражают взаимодействие системных исследований в приготовлении между собой.

Отличительная особенность системных исследований заключается в исследовании объектов, которые рассматриваются в виде системы, то есть множества взаимосвязанных элементов, представляющие собой единое целое [1].

В системных исследованиях приготовления белкового комбикорма для сельскохозяйственных животных основными сферами их являются системный подход и научные знания о системах.

При системном подходе к приготовлению белкового комбикорма его можно разделить на три вида – сыпучий, гранулированный и жидкий, или влажноватый.

Белковый комбикорм в трех видах готовится по одинаковой схеме, но с одним отличием. Отличие сыпучего и гранулированного корма от



**Рис. 1. Классификация системных исследований приготовления белкового комбикорма для сельскохозяйственных животных**

жидкого заключается в применении кавитационного диспергатора. На стадии измельчения и смешивания компонентов, которые входят в приготовление комбикорма имеются мультимедийные устройства, контролирующие данный технологический процесс.

В научной системной теории пойдем по пути «точной технологии животноводства», которую рассматривал академик Л.П. Кормановский. Технология построена на основе математических моделей, полученных в результате теоретических исследований (анализа) и экспериментально (эмпирически). Эмпирическая модель не может существовать без теоретической математической модели. В свою очередь, «точная технология животноводства» должна базироваться на технических системах математической модели и конкретных технических разработках устройств и технологий приготовления белкового комбикорма.

## Результаты исследования

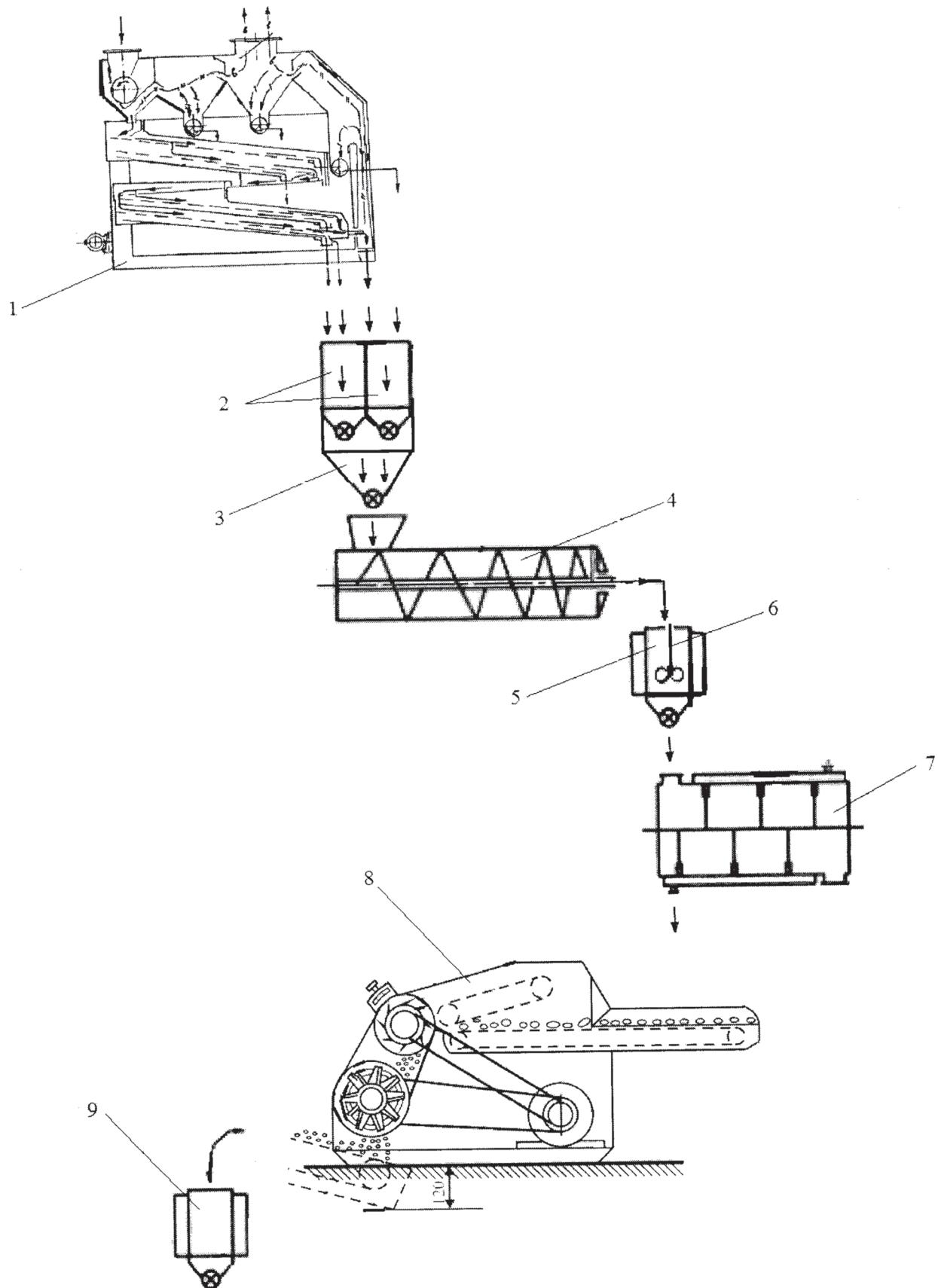
Для приготовления белкового корма в сыпучем [6] и гранулированном видах с целью снижения энергоемкости процесса и повышения его качества была разработана линия его осуществления (патент № 2646092 [4]) и способ (патент № 2636480 [5]).

Линия для приготовления белкового корма в сыпучем и гранулированном видах (рис. 2)

имеет последовательно установленную воздушно-решетную зерноочистительную машину 1. Под машиной 1 установлен бункер 2 для хранения продукта переработки масличных культур, выполненный в виде двух отсеков, под которыми расположена накопительная емкость 3 с выходным отверстием, установленный над бункером экструдер 4, его выход сообщен с бункером емкости 5 для обогащения питательными микроэлементами продукта переработки масличных культур. Внутри емкости 5 установлена мешалка 6, приводимая в движение двигателем (на рисунке не показан). Выходное отверстие емкости 5 установлено над входным отверстием кондиционера 7 и сообщено с измельчителем 8, на выходе которого установлена емкость для хранения корма 9.

Технологический процесс работы линии для приготовления белкового корма в сыпучем и гранулированном видах осуществляется следующим образом.

В бункер воздушно-решетной зерноочистительной машины 1 поступают компоненты вороха семян подсолнечника сорта Лакомка, в состав которых входят фрагменты корзинок и стеблей и семена подсолнечника, после вторичной очистки их экструдируют. Из воздушно-решетной зерноочистительной машины 1 отходы в виде фрагментов корзинок и стеблей и семена подсолнечника после вторичной очист-



**Рис. 2. Общий вид линии для приготовления белкового корма по патенту № 2646092 [4] в сыпучем и гранулированном видах**

ки отдельно друг от друга подают в двойной бункер 2. Затем они смешиваются в накопительной емкости 3 и поступают в экструдер 4. Использование двойного бункера 2 с накопительной емкостью 3 позволяет обеспечить бесперебойное производство корма за счет уравнивания производительности воздушно-решетной зерноочистительной машины 1 и экструдера 4.

Экструдация смеси осуществляется путем нагревания продукта до температуры 110–170 °C и под давлением 4–6 МПа в процессе обработки. После экструдации полученный продукт в виде бесконечного жгута поступает в емкость 5, где обогащается путем смешивания с питательными микроэлементами (йодистый калий, марганца сульфат, меди сульфат, цинка сульфат, кобальта хлорид) из расчета 1:50. Если взять меньшее соотношение, то будет недостаточное количество питательных микроэлементов в корме, а если большее, то будет его перенасыщение, что приведет к ухудшению качества корма. Далее смесь охлаждают посредством кондиционера 6 до температуры 30–36 °C и измельчают корм до рассыпного вида с размерами гранул 3–5 мм, и хранят в емкости 9. Для измельчения используют любую известную конструкцию измельчителя, способную измельчать корм до размера гранулы 3–5 мм для приготовления корма в сыпучем виде и гранулы 5–7 мм – гранулированном виде. При температуре меньше 30 °C полученная смесь теряет свойство гигроскопичности и происходит неэффективное измельчение, а если выше 36 °C, то свойство гигроскопичности увеличивается и корм при измельчении будет сбиваться в комки.

Предположим, система  $S$  [1] в роли которой выступает сама линия по Пат. № 2646092 имеет некоторые элементы  $a_1, a_4, a_5, a_7, a_8$  и  $a_0$  – окружение системы  $S$ . В роли элементов в нашем случае – технические устройства (1, 4, 5, 7, 8). Введем множества  $A = \{a_1, a_4, a_5, a_7, a_8\}$  и  $B = \{a_0, a_1, a_4, a_5, a_7, a_8\}$ . В множестве  $B$  каждый элемент характеризуется некоторым множеством входных и выходных величин. Введем символ  $r_{ij}$ , который обозначает способ зависимости, входных величин от выходных элемента  $a_i$ , множество  $r_{ij}$  обозначаем через  $R$ . В данном случае система определяется множеством  $S = \{A, R\}$  и образует систему.

## Заключение

Анализ в данной области показал отсутствие системных исследований приготовления белкового комбикорма на основе общей теории

системы применительно к «точной технологии животноводства», а именно к «точной технологии приготовления белкового комбикорма» с помощью мультимедийного устройства, контролирующего технологический процесс. В качестве мультимедийного устройства может выступать смартфон, планшетный компьютер, который соединяется с персональным компьютером для обработки полученных данных с устройством. Поэтому необходимо разработать математическую модель на базе теории общей системы применительно к точной технологии приготовления белкового комбикорма. Разработанная математическая модель позволила повысить пищевую ценность белковых комбикормов, а также расширить их ассортимент для кормления крупного рогатого скота, а именно: для каждого вида сельскохозяйственного животного с его физиологической особенностью и потребностью в них, и улучшить экологию окружающей среды.

## Литература

- Садовский В.Н. Основания общей теории систем. М.: Изд-во Наука, 1974. С. 93–245.
- Садов В.В. Обоснование структуры и состава технологических линий для производства комбикормов в сельскохозяйственных предприятиях: дис. ... докт. техн. наук. Барнаул: Алтайский ГТУ им. И.И. Ползунова. 294 с.
- Диязитдинова А.Р., Кордонская И.Б. Общая теория систем и системный анализ. Самара: ПГУТИ, 2017. 125 с.
- Линия для получения белкового корма: пат. 2646092 Российская Федерация: МПК A23N17/00 / И.Е. Припоров; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина». № 2017103709; заявл. 03.02.2017; опубл. 01.03.2018. Бюл. № 7.
- Способ получения белкового корма: пат. 2636480 Российская Федерация, МПК A23K 10/30, A23K 40/10 / И.Е. Припоров; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина». № 2017103859; заявл. 06.02.2017; опубл. 23.11.2017. Бюл. № 33.
- Пат. 2177216 Российская Федерация: МПК A 01C 15/00 A, 7A 01C 17/00 B, 7E 01C 19/20 B, 7B 65G 31/04. Устройство для поверхностного рассева минеральных удобрений и других сыпучих материалов / Ю.И. Якимов, В.П. Иванов, Е.В. Припоров, В.П. Заярский, Г.И. Волков,

О.Б. Селивановский; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет». № 2000106333/13; заявл. 14.03.2000; опубл. 27.12.2001.

## References

1. Sadovskij V.N. Osnovaniya obshchej teorii system [Foundations of the general theory of systems]. Moscow: Izd-vo Nauka Publ., 1974, pp. 93–245.
2. Sadov V.V. Obosnovanie struktury i sostava tekhnologicheskikh linij dlya proizvodstva kombikormov v sel'sko-hozyajstvennyh predpriyatiyah: diss. ... d-ra tekhn. nauk [Justification of the structure and composition of techno-logical lines for the production of animal feed in agricultural enterprises: Dissertation for Degree of Dr.Eng.]. Barnaul: Altajskij GTU im. I.I. Polzunova. 294 p.
3. Diyazitdinova A.R., Kordonskaya I.B. Obshchaya teoriya sistem i sistemnyj analiz [General system theory and systems analysis]. Samara: PGUTI, 2017. 125 p.
4. Patent No 2646092 Rossijskaya Federaciya: MPK A23N17/00. Liniya dlya polucheniya belkovogo korma [Line for the production of protein feed]. I.E. Priporov; zayavitel' i patentooobladelel' FGBOU VO «Kubanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. I.T. Trubilina». No 2000106333/13; zayavl. 03.02.2017; opubl. 01.03.2018. Byul. No 7.
5. Patent No 2636480 Rossijskaya Federaciya: MPK A23K 10/30, A23K 40/10. Sposob polucheniya belkovogo korma [The method of producing a protein feed]. I.E. Priporov; zayavitel' i patentooobladelel' FGBOU VO «Kubanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet im. I.T. Trubilina». No 2017103859; zayavl. 06.02.2017; opubl. 23.11.2017. Byul. No 33.
6. Patent No 2177216 Rossijskaya Federaciya: MPK A 01C 15/00 A, 7A 01C 17/00 B, 7E 01C 19/20 B, 7B 65G 31/04. Ustrojstvo dlya poverhnostnogo ras-seva mineral'nyh udobrenij i drugih sypuchih materialov [Device for surface sieving of mineral fertilizers and other bulk materials]. Y.U.I. Yakimov, V.P. Ivanov, E.V. Priporov, V.P. Zayarskij, G.I. Volkov, O.B. Selivanovskij; zayavitel' i patentooobladelel' FGBOU VO «Kubanskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet». No 2000106333/13; zayavl. 14.03.2000; opubl. 27.12.2001.

# РЕГРЕССИОННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВУХЭТАПНОЙ КОМБИНИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ И ОЗОНОВОЗДУШНОЙ ОБРАБОТКИ ЗЕРНА

## REGRESSION MATHEMATICAL MODEL OF TWO-STAGE COMBINED ELECTRICAL TECHNOLOGY OF HIGH-TEMPERATURE CONVECTIVE DRYING AND OZONE-AIR GRAIN PROCESSING

В.И. ПАХОМОВ, д.т.н.  
В.С. ГАЗАЛОВ, д.т.н.  
К.Н. БУХАНЦОВ

СКНИИМЭСХ ФГБНУ «АНЦ «Донской», Зерноград,  
Россия, buhantsov.k@gmail.com

V.I. PAHOMOV, DSc in Engineering  
V.S. GAZALOV, DSc in Engineering  
K.N. BUHANCOV

Federal State Budgetary Scientific Institution «Agrarian Center  
«Donskoy», Zernograd, Russia, buhantsov.k@gmail.com

Большие объемы производства в России зерновых колосовых культур в 2014–2018 гг. (100–130 млн. т) подразумевают необходимость сушки 10–30 % ежегодно собираемого в стране урожая для обеспечения его количественной и качественной сохранности. Основным способом снижения избыточной влажности зерна в РФ является высокотемпературная конвективная сушка, но она относится к очень энергоемким технологическим операциям и поэтому весьма дорогостоящая. В условиях постоянного роста цен на энергоносители в российской экономике перед сельхозпредприятиями страны стоит первостепенная задача повышения рентабельности зерновой отрасли, в рамках которой необходимо снижать материальные затраты на всех этапах производства, в том числе за счет создания новых высокointенсивных энергосберегающих технологий и технических средств для сушки зернового сырья. Авторы разработали отвечающую этим требованиям двухэтапную технологию высокотемпературной конвективной и озоновоздушной сушки зерна. В статье на основе анализа параметрической схемы конвективно-озоновоздушного способа удаления влаги, составленной с учетом условий и возможностей проведения экспериментальных исследований процесса на промышленной сушильной установке «ЭЛЕКТА-1» небольшой производительности, определены параметры оптимизации этого процесса, в качестве которых приняты: уменьшение продолжительности сушки и суммарное снижение энергозатрат на нее, кроме того выделены основные варьируемые в опытах факторы: начальная влажность зерна, величина подачи озона на 1 м<sup>3</sup> зерна и затраты времени на удаление влаги. Разработаны регрессионные математические модели второго порядка для процесса конвективно-озоновоздушной сушки зерна ячменя с разной начальной влажностью (30, 25 и 20 %), и проведена оценка их статистической значимости. Анализ экспериментальных данных исследованных вариантов комбинированной сушки при 6%-м влагосъеме за один цикл обработки зернового материала выявил следующие параметры эффективности способов конвективно-озоновоздушного удаления влаги: при сушке зерна с начальной влажностью 30 % снижение продолжительности процесса произошло на 28 %, а уменьшение суммарных энергозатрат составило 33–43 %; при сушке зерна с влажностью 25 % снижение продолжительности процесса – на 19 %, энергозатрат – на 24–35 %; а при сушке зерна влажностью 20 % снижение продолжительности процесса – на 30–35 %, энергозатрат – на 35–40 %.

**Ключевые слова:** конвективный нагрев, озоновоздушная сушка, регрессионная математическая модель, подача озона, продолжительность сушки, экспериментальные исследования, влажность зерна, энергозатраты.

Large production of cereal crops in Russia in 2014–2018 (100–130 million tons) imply the need to dry 10–30 % of the crop collected annually in the country to ensure its quantitative and qualitative preservation. The main way to reduce the excess moisture of grain in the Russian Federation is high-temperature convective drying, but it refers to very energy-intensive technological operations and, therefore, is very expensive. In the context of the constant increase in energy prices in the Russian economy, the country's agricultural producers face the primary task of increasing the profitability of the grain industry, within which it is necessary to reduce material costs at all stages of production, including through the creation of new high-intensity energy-saving technologies and technical means for drying grain raw materials. The authors have developed a two-stage technology of high-temperature convective and ozone-air grain drying that meets these requirements. In the article, based on the analysis of the parametric scheme of the convective-ozone-air moisture removal method, compiled taking into account the conditions and possibilities of conducting experimental studies of the process at the industrial drying unit «ELEKTA-1» of small productivity, the optimization parameters of this process are defined, which are: reduction of the drying time and the total reduction in energy consumption, in addition, the main factors varied in the experiments are highlighted: the initial moisture

content of the grain, the amount of ozone supply to 1 m<sup>3</sup> of grain and time spent on moisture removal. Second-order regression mathematical models for the convective-ozone-air drying of barley grain with different initial humidity (30, 25 and 20 %) have been developed and their statistical significance has been evaluated. An analysis of the experimental data of the combined drying options studied at 6 % moisture removal for one cycle of processing the grain material revealed the following parameters of the efficiency of the methods of convective ozone-air moisture removal: when drying grain with an initial humidity of 30 %, the process duration decreased by 28 % and the total energy consumption decreased amounted to 33–43 %; when drying grain with a moisture content of 25 %, the duration of the process is reduced by 19 %, energy consumption by 24–35 %; and when drying grain with a moisture content of 20 %, the duration of the process is reduced by 30–35 %, energy consumption by 35–40 %.

**Keywords:** convective heating, ozone-air drying, regression mathematical model, ozone flow, drying time, experimental studies, grain moisture, energy consumption.

## Введение

Россия является крупным мировым производителем зерна, сборы которого в стране в 2014–2017 гг. устойчиво превышают 100 млн т, а в 2018 г. суммарный урожай зерновых культур перешагнул отметку в 130 млн т [1–4]. После уборки из этого количества выращенного зерна в сушке ежегодно нуждается от 15 до 30 %, что существенно зависит от погодно-климатических условий в текущем сельскохозяйственном году.

Необходимость снижения повышенной влажности зерновых материалов до кондиционных значений (13–14 %) связана с тем, что даже при краткосрочном хранении (от 1–5 до 7–14 дней) во влажном состоянии возникают существенные количественные потери зерна и происходит еще более значительное ухудшение его показателей качества (семенных, технологических, кормовых), а учитывая количественную долю в урожае зернового сырья, нуждающегося в сушке, его порча может нанести весьма чувствительный урон экономике страны и финансовой стабильности многих сельхоз хозяйственных товаропроизводителей.

Наиболее распространенными в производстве технологиями снижения влажности зерна являются различные варианты процессов высокотемпературной конвективной сушки, большинство из которых очень энергоемкие и по многим известным данным в 1,2–2,8 раза превышают установленное нормативное значение удельных энергозатрат на испарение влаги в данном виде процессов (5000 кДж/кг исп. вл. [5]), приведенных к стандартным условиям. Причем величина энергоемкости практически не зависит от конструктивного разнообразия и принципов работы реализующих ее (конвективную технологию) зерносушилок.

В условиях быстрого роста цен за последние годы на все виды энергоносителей на внутреннем рынке РФ перед производителя-

ми зерна все острее встает задача снижения энергетических затрат на процессы сушки и повышения их производительности за счет интенсификации влагосъема при одновременном сохранении показателей качества зернового сырья. Практика научных исследований показывает, что наилучший комплексный результат в обеспечении энергосбережения и ускорения процессов сушки зерна обеспечивают комбинированные технологии его обработки на основе сочетания двух и более видов воздействий (конвективно-сверхвысокочастотная сушка, рециркуляционная сушка конвективно-сорбционная, технология «драйэрации» (комбинация высокотемпературной конвективной сушки и малообъемного активного вентилирования) и некоторые др.). Однако таких энергоэффективных способов снижения влажности зерна, доведенных до производственного использования, очень мало и они имеют ограничения для своего применения: из-за низкой эксплуатационной надежности и высокой стоимости некоторых элементов оборудования (СВЧ-генераторов), из-за возможности реализации процесса только в сушильных установках высокой производительности (20 т/ч и более), из-за необходимости больших материальных затрат на строительство капитальных сооружений, обеспечивающих выполнение отдельных этапов сушки (бункеров активного вентилирования, металлических силосов, напольных складов и т.д.), а также по ряду других причин.

Учитывая недостатки перечисленных комбинированных способов снижения влажности зерна и продолжая решать актуальную хозяйственную задачу по снижению энергоемкости и обеспечению интенсификации процесса высокотемпературной конвективной сушки зерна, при условии использования его на прямоточных сушилках малой, средней и большой производительности, авторы разработали

оригинальный двухэтапный комбинированный способ конвективно-озоновоздушной сушки зерновых материалов [6, 7], особая структурная компоновка которого позволяет обеспечить повышение технологической эффективности процесса, требуемой в производстве [7–10].

Предлагаемый способ сушки зерна состоит из двух последовательных этапов с непрерывной подачей зернового материала на обоих сверху вниз в плотном слое, на первом – с перемешиванием зерна в слое и продувом его высокотемпературным теплоносителем, на втором этапе – с перемешиванием нагретого частично подсущенного материала в слое и продувом его неподогретым озонированным воздухом с последующим подогревом этого воздуха (отработанного) до температуры, обеспечивающей термическое разложение остаточного озона и использованием полученного теплоносителя на первом этапе сушки [6, 9, 10].

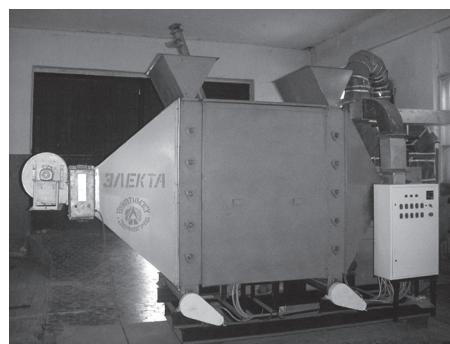
Элементы электротехнологии высокотемпературной конвективной и озоновоздушной сушки зерна уже экспериментально исследовались на лабораторной установке, но только при ряде допущений: в стационарном непреремешиваемом слое материала, без применения термоутилизации озона в отработанной озоновоздушной смеси (ОВС) и без рекуперации тепла с этапа сушки неподогретым озонированным воздухом [11, 12]. Некоторые режимные параметры процесса были найдены уже на этом этапе исследований, но в целом все преимущества (энергоэкономия, интенсификация влагосъема, повышение качества зерна и др.) предложенной технологии конвективно-озоновоздушной сушки могут быть выявлены только

при экспериментальном изучении процесса на базе малой производственной зерносушилки «ЭЛЕКТА-1», специально разработанной для его реализации [13, 14]. Хотя, согласно нашим собственным исследованиям, предложенный комбинированный способ выполним на всех типах конвективных шахтных зерносушилок поточного действия, но только после небольшой доработки их конструкции [15].

### Материалы и методы исследований

Проведем экспериментальные исследования комбинированного способа высокотемпературной конвективной и озоновоздушной сушки зерна ячменя на установке «ЭЛЕКТА-1». Исследования выполним для частного случая реализации данного способа, когда на первом этапе происходит только конвективный нагрев материала высокотемпературным теплоносителем без количественно значимого удаления влаги при этом, а на втором этапе горячее зерно сушится продуванием через него неподогретого озонированного воздуха.

Зерносушилка «ЭЛЕКТА-1» (схема которой представлена на рис. 1), на которой проводились опыты, состоит из загрузочного бункера 1 первой сушильной секции, вертикальной камеры высокотемпературной конвективной сушки 2 (первой сушильной секции), в которой расположены равномерно по высоте пять пар ворошителей 3 с горизонтальными осями вращения, выпускного отверстия 11 первой сушильной секции с расположенным на выходе из него шnekовым устройством транспортирования зерна (на рис. 1, б не показано), которое подает материал в транспортер 14, перегру-



*a*

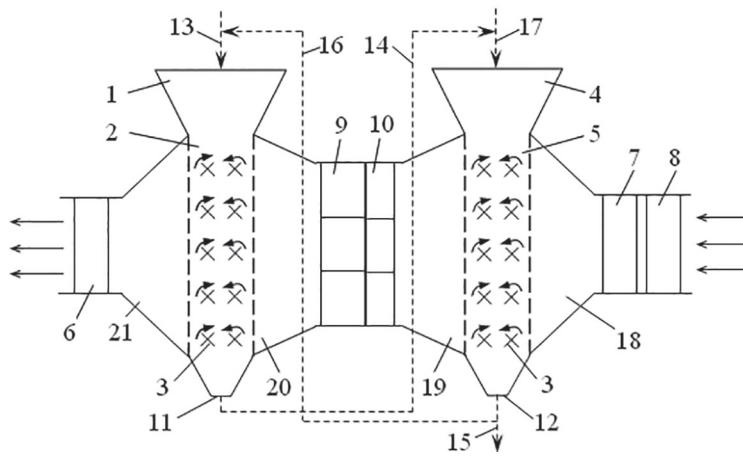


Рис. 1. Внешний вид (*a*) и конструктивно-функциональная схема (*б*) установки «ЭЛЕКТА-1» для конвективно-озоновоздушной сушки зерна

жающий зерновой материал с первой секции во вторую, загрузочного бункера 4 второй сушильной секции, вертикальной камеры озоновоздушной обработки зерна 5 (вторая сушильная секция) с ворошителями 3 с таким же расположением и такой же конструкции, как и в камере 2, выпускного отверстия 12 с расположенным на выходе из него устройством транспортирования зерна (на рис. 1, б не показано), которое перемещает материал к выгрузному отверстию установки 15 [13, 14].

В рассматриваемой сушильной установке кроме основного загрузочного устройства 13 с бункером зерна [15], подающего материал в первую сушильную секцию, предусмотрено также устройство 17, предназначенное для отдельной загрузки зерна во вторую сушильную секцию, а также перегрузочный транспортер 16 для возврата зернового материала в первую сушильную камеру на повторный цикл обработки [14].

Система подготовки и транспортирования теплоносителя, работающая в составе установки, содержит вентилятор 8 озонатора, предназначенный для подачи атмосферного воздуха на электроразрядную обработку и одновременно на охлаждение электродов и дизлектрических барьеров разрядника, озонатор объемного барьерного разряда 7 с регулируемой производительностью, воздуховод-конфузор 18, соединяющий выходное отверстие озонатора со второй сушильной секцией 5 установки, дающий возможность поперечной подачи озонированного воздуха в вертикально перемещающейся слой зерна через перфорированную стенку секции, воздуховод-диффузор 19, соединяющий выход второй сушильной секции 5 установки с входом вентиляторов 10, по которому отработанный озонсодержащий воздух подается на подогрев и разложение остаточного озона в теплоЭлектро-нагреватели 9. Затем располагается воздуховод-конфузор 20, соединяющий выход блока ТЭНов с входом первой сушильной секции 2. По нему нагретый теплоноситель подается через перфорированную стенку в вертикально перемещающейся слой зерна, на выходе из которого он попадает в воздуховод-диффузор 21, соединяющий выход первой сушильной секции 2 установки с вытяжным вентилятором 6, выполняющим удаление отработанного теплоносителя из установки. Именно вентилятор 6 обеспечивает последовательную прокачку агента сушки через оба слоя зерна, проходящего обработку в рабочих

камерах 2 и 5 комбинированной зерносушилки [13, 14].

В методике эксперимента, разработанной для исследования конвективно-озоновоздушной сушки зерна на лабораторной установке [11], в качестве варьируемых (управляемых) величин использовались шесть технологических факторов: толщина слоя материала ( $b_3$ , мм); скорость воздуха ( $v_{a.c.} = v_{\text{конв.}} = v_{\text{OBC}}$ , м/с); начальная влажность зерна ( $W_{h_3}$ , %); продолжительность конвективной сушки ( $\tau_{\text{конв.}}$ , мин); продолжительность озоновоздушной сушки ( $\tau_{\text{OBC}}$ , мин), концентрация озона в ОВС ( $O_{\text{оз.}} = O_{\text{оз.н.}}$ , кг/м<sup>3</sup>). Их влияние определялось на параметры оптимизации процесса обезвоживания зернового материала (снижение влажности зерна  $\Delta W = W_{h_3} - W_{k_3}^{\text{OBC}}$  и удельные энергозатраты на испарение влаги  $\dot{E}_{\text{уд.}}$ ).

В малой производственной установке «ЭЛЕКТА-1» не предусмотрено столь гибкое и разнообразное регулирование технологических параметров исследуемого способа высокотемпературной конвективной и озоновоздушной сушки зерна как в лабораторной, поэтому, чтобы выбрать для данной сушилки варьируемые в опытах факторы, составим и проанализируем параметрическую схему изучаемого варианта комбинированного процесса (рис. 2), которая будет отражать направления движения материальных потоков (зерна, нагретого воздуха, ОВС) в установке и основные параметры двухэтапной сушки, протекающей в ней.

#### Конвективный нагрев (1-й этап сушки)

Входными параметрами этапа конвективного нагрева являются: начальная влажность  $W_{h_3}$ , температура  $t_{h_3}$  и качество зерна  $k_{h_3}$ ; температура  $t_{h.B}$ , относительная влажность  $\varphi_{h.B}^{\text{конв.}}$ , влагосодержание  $d_{h.B}^{\text{конв.}}$  и давление  $B_{h.B}^{\text{конв.}}$  теплоносителя после ТЭН; продолжительность конвективного нагрева  $\tau_{\text{конв.}}$ ; толщина зернового слоя  $b_3$ ; скорость  $v_{h.B}^{\text{конв.}}$  и расход  $Q_{h.B}^{\text{конв.}}$  агента сушки; расход зерна  $Q_3$ , порозность зернового материала  $\varepsilon$  и суммарная поверхность тепломассообмена зерновых частиц в слое  $F_{h_3}$ ; остаточное количество озона в теплоносителе после ТЭН  $O_{\text{оз.}}^{\text{TЭН}}$ .

К выходным параметрам относятся: конечная влажность  $W_{k_3}^{\text{конв.}}$ , температура  $t_{k_3}^{\text{конв.}}$  и качество зерна  $k_{k_3}^{\text{конв.}}$ ; конечная температура  $t_{k_3}^{\text{конв.}}$ , относительная влажность  $\varphi_{k.B}^{\text{конв.}}$ , влагосодержание  $d_{k.B}^{\text{конв.}}$  и давление  $B_{k.B}^{\text{конв.}}$  отработавшего агента сушки; конечная скорость  $v_{h.B}^{\text{конв.}}$  и расход  $Q_{k.B}^{\text{конв.}}$  отработавшего агента сушки.

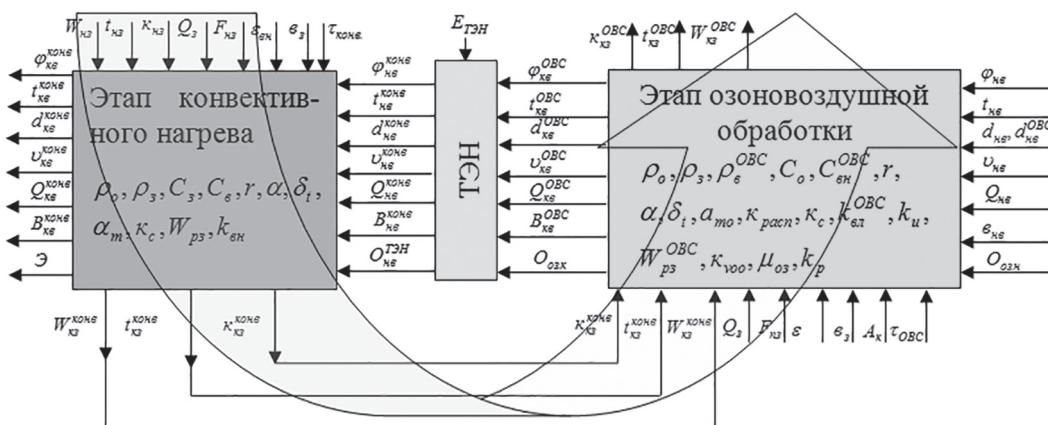


Рис. 2. Параметрическая схема комбинированного процесса конвективно-озоновоздушной сушки зерна для установки «ЭЛЕКТА-1»

К внутренним параметрам слоя зерна и агента сушки относятся их качественные характеристики, физические, механические, химические, теплофизические и термодинамические свойства: коэффициенты теплообмена  $\alpha$ , массообмена  $k_{\text{вн}}$ , диффузии влаги  $\alpha_m$ , относительный коэффициент термодиффузии влаги  $\delta_t$ , теплопроводность  $C$ , удельная теплота парообразования  $r$ , плотность  $\rho$ , равновесная влажность зерна  $W_{\text{рз}}$  и другие. Все внутренние параметры процесса, как и входные параметры, определяют результаты сушки, т.е. выходные параметры.

### Озоновоздушная сушка (2-й этап сушки)

Входными параметрами этапа озоновоздушной обработки (сушки) являются: начальная влажность  $W_{\text{нз}}^{\text{обс}}$  температура  $t_{\text{нз}}^{\text{обс}}$  и качество зерна  $K_{\text{нз}}^{\text{обс}}$ ; начальная температура  $t_{\text{нв}}^{\text{обс}}$ , относительная влажность  $\varphi_{\text{нв}}^{\text{обс}}$ , влагосодержание  $d_{\text{нв}}^{\text{обс}}$  и давление  $B_{\text{нв}}^{\text{обс}}$  агента сушки; начальная концентрация озона  $O_{\text{о3.н}}$  в агенте сушки, продолжительность озоновоздушной сушки  $\tau_{\text{обс}}$ , площадь поперечного сечения сушильной камеры  $A_k$ , толщина зернового слоя  $b_3$ , начальная скорость  $v_{\text{нв}}^{\text{обс}}$  и расход  $Q_{\text{нв}}^{\text{обс}}$  озоновоздушной смеси, расход зерна  $Q_3$ , порозность зернового материала при механическом ворошении  $\varepsilon$  и суммарная поверхность тепло- и массообмена зерновых частиц в слое  $F_{\text{п.з.}}$ .

К выходным параметрам относятся: конечная влажность  $W_{\text{кз}}^{\text{обс}}$ , температура  $t_{\text{кз}}^{\text{обс}}$  и качество зерна  $K_{\text{кз}}^{\text{обс}}$ ; конечная температура  $t_{\text{кв}}^{\text{обс}}$ , относительная влажность  $\varphi_{\text{кв}}^{\text{обс}}$ , влагосодержание  $d_{\text{кв}}^{\text{обс}}$  и давление  $B_{\text{кв}}^{\text{обс}}$  отработавшей озоновоздушной смеси; конечная концентрация озона  $O_{\text{о3.к}}$  в агенте сушки, конечная скорость  $v_{\text{кв}}^{\text{обс}}$  и расход  $Q_{\text{кв}}^{\text{обс}}$  озоновоздушной смеси.

К внутренним параметрам слоя зерна, озоновоздушного агента сушки и его компонен-

тов относятся: коэффициенты теплообмена  $\alpha$  массообмена  $k_{\text{вн}}^{\text{обс}}$ , диффузии влаги  $\alpha_t$ ; относительный коэффициент термодиффузии влаги  $\delta_t$ , теплопроводность  $C$  (зерна, ОВС), удельная теплота парообразования воды  $r$ , плотность  $\rho$  (зерновки, зернового слоя, ОВС); коэффициенты распада озона в нагретом зерне  $K_{\text{расп}}$ , объемной массопередачи озона  $K_{\text{о3}}$ , молярного переноса влаги  $k_p^{\text{обс}}$  и др. Внутренние параметры относятся к исходным данным процесса и находятся из литературных источников (справочников), а в отдельных случаях определяются экспериментально.

Анализ данных параметрической схемы процесса конвективно-озоновоздушной сушки (рис. 2), составленной для установки «ЭЛЕКТА-1», показал, что фигурирующие в ней технологические факторы (входные, выходные, внутренние) практически идентичны тем, которые рассматривались и использовались при лабораторных экспериментальных исследованиях [11, 12]. А поскольку исследуемые в опытах процессы сушки на лабораторной и производственной установках, в принципе, одинаковы, то варьируемые в эксперименте параметры процесса, полученные в лабораторных опытах, можно перенести с лабораторной сушилки на «ЭЛЕКТА-1» при некоторой их корректировке под ее технические возможности.

В связи с тем, что в проведенных исследованиях на первом этапе комбинированного способа удаления влаги выполнялся только нагрев зерна (без сушки), то экспериментальное изучение процесса на установке «ЭЛЕКТА-1» проведем, управляя только параметрами этапа озоновоздушной обработки (2-й этап комбинированного способа) [17], при этом время конвективного нагрева  $\tau_{\text{конв}}$  зерна будет по-

стоянным и напрямую в эксперименте рассматриваться не будет. Температура нагрева теплоносителя, подаваемого в слой зернового материала в процессе опытов, на 1-м этапе конвективно-озоновоздушного способа сушки составляет  $t_{\text{нв}}^{\text{конв.}} = 82-85^{\circ}\text{C}$ , а величина нагрева влажного зерна на этапе конвективной обработки немного колеблется и составляет  $t_{\text{kz}}^{\text{конв.}} = 45-52^{\circ}\text{C}$ , что не превышает допустимой температуры нагрева зерна, способной ухудшить его качество.

Поскольку прочность связей влаги с сухим веществом зерна, величина влагосъема в процессе сушки, его интенсивность и удельные энергозатраты существенно зависят, в том числе, и от начальной влажности зернового материала, то исследование и моделирование конвективно-озоновоздушной сушки проводилось отдельно для трех значений начальной влажности зерна 20, 25 и 30 %. При этом для опытов использовалось искусственно увлажненное до заданных значений зерно ячменя, прошедшее отлежку в течение двух суток в герметичных условиях при положительных пониженных температурах окружающего воздуха ( $7-11^{\circ}\text{C}$ ) с целью обеспечения равномерного распределения влаги по объему отдельных зерновых частиц зерновой массы, подготавливаемой для экспериментов [12, 17].

Выходными контролируемыми параметрами процесса конвективно-озоновоздушной сушки в эксперименте являлись: конечная влажность  $1 \text{ м}^3$  зерна ( $W_{i,j} \%$ ), уменьшение продолжительности удаления влаги ( $\Delta t_{i,j} \%$ ) и снижение величины энергозатрат на процесс ( $\mathcal{E}_{i,j} \%$ ). Варьируемыми в опыте технологическими факторами на этапе озоновоздушной сушки приняты: подача озона на  $1 \text{ м}^3$  высушиваемого зерна ( $Q_{\text{coz}}$ ,  $\text{мг/с}$ ) и время сушки ( $\tau$ , мин). Величина подачи озона вычисляется по формуле:

$$Q_{\text{coz}} = \frac{O_{\text{озн.}} \cdot Q_{\text{нв.}}}{v_3 \cdot A_k}. \quad (1)$$

Из выражения (1) видно, что  $Q_{\text{coz}}$  является комплексным параметром, включающим в себя три варьируемых фактора с этапа лабораторных исследований [11, 12]  $Q_{\text{coz}} = f(O_{\text{озн.}}, v_{\text{OBC}}, v_3)$ , а также площадь поперечного сечения сушильной камеры ( $A_k, \text{м}^2$ ) и толщину зернового слоя ( $v_3, \text{м}$ ) в опытах, проводимых на сушилке «ЭЛЕКТА-1», исходя из ее конструктивных особенностей, являются постоянными величинами одинаковыми для этапа конвективного нагрева и этапа озоно-воздушной сушки.

Уровни варьирования подачи озона на  $1 \text{ м}^3$  высушиваемого зерна в экспериментах приняты для начальной влажности зернового материала  $W_{1\text{н.з.}} = 30 \% - Q_{\text{coz}} = 4, 12$  и  $20 \text{ мг/с}$ ; для  $W_{2\text{н.з.}} = 25 \% - Q_{\text{coz}} = 2, 7$  и  $12 \text{ мг/с}$ ; и для  $W_{3\text{н.з.}} = 20 \% - Q_{\text{coz}} = 6, 18$  и  $30 \text{ мг/с}$ . Время сушки изменяется  $\tau =$  от 0 до 260 мин с интервалом в  $\Delta\tau = 10$  мин (всего  $n = 27$  точек замера), притом, что в каждый момент фиксирования времени сушки отбиралась проба зерна ячменя для оценки ее относительной влажности. Влажность опытных проб зерна определялась весовым методом в четырех повторностях по ГОСТ 13586.5-93 на базе агрохимической лаборатории СКНИИМЭСХ.

Способ сушки зерна, исследуемый «в контроле», также как и в основных опытах, состоял из двух этапов: на 1-ом этапе происходил конвективный нагрев материала без существенного для практики удаления влаги, а на 2-м выполнялась сушка зерна атмосферным неподогретым воздухом не содержащим озона. На обоих этапах снижения влажности «в контроле» расход воздуха через слой высушиваемого материала составлял  $Q_{\text{в}}^{\text{конв.}} = Q_{\text{в}}^{\text{атм.}} = 870-900 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Изменение времени сушки на 2-м этапе процесса (при обработке атмосферным воздухом) происходило в том же диапазоне и с таким же интервалом варьирования, как и на этапах сушки ОВС в опытах, и с оценкой величины относительной влажности высушиваемого зерна в фиксируемые моменты времени.

## Анализ и обсуждение результатов исследований

Обработку экспериментальных данных для трех разных вариантов комбинированной конвективно-озоновоздушной сушки зерна проводили с использованием специализированной компьютерной программы Statistica.

В результате статистической обработки опытных данных [18-19], полученных при исследовании комбинированного способа сушки зерна с начальной влажностью  $W_{1\text{н.з.}} = 30 \%$  (1-й вариант процесса), была построена поверхность отклика (рис. 3), которая имеет единственный явно выраженный минимум и представляет собой зависимость влажности  $1 \text{ м}^3$  высушиваемого зерна ( $W = W_3^{30 \%}, \%$ ) от подачи озона ( $Q_{\text{coz}}$ ,  $\text{мг/с}$ ) и времени сушки ( $\tau$ , мин). Данная поверхность математически описывается уравнением регрессии второго порядка (2), которое представляет собой

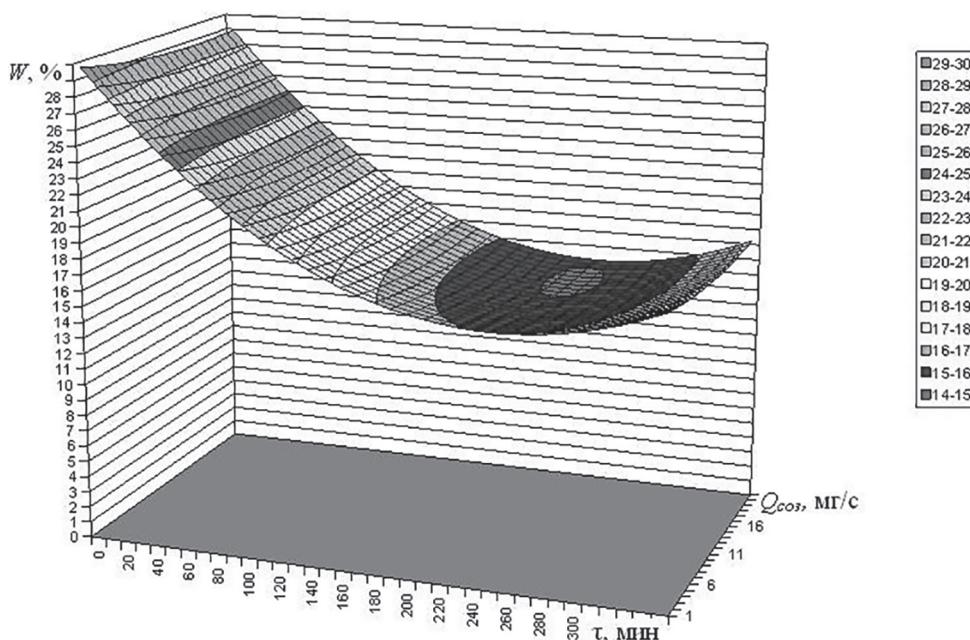


Рис. 3. Поверхность отклика, описывающая процесс конвективно-озоновоздушной сушки 1 м<sup>3</sup> зерна с начальной влажностью  $W_{1h.z.} = 30 \%$

аналитическую модель процесса комбинированной электрофизической сушки зерна  $W_3^{30\%} = f(Q_{\text{оз}}, \tau)$ :

$$W_3^{30\%} = 29,9498 - 0,13922 \cdot Q_{\text{оз}} - 0,11048 \cdot \tau + 0,00423 \cdot Q_{\text{оз}}^2 + 0,00022 \cdot \tau^2. \quad (2)$$

Проверка адекватности уравнения (2) была выполнена на основе вычисления критерия Фишера ( $F_{30\%}$ ) по методике В.М. Гусарова [20, 21] и сравнения полученного значения с критическим (табличным) значением  $F$ -критерия ( $F_{\text{крит.}}$ ) при условии обязательного соблюдения неравенства  $F_{30\%} > F_{\text{крит.}}$ .

Расчетное значение критерия Фишера составило  $F_{30\%} = 3289,43$ , а критическое значение  $F$ -критерия для принятого уровня значимости 0,05 и чисел степеней свободы  $v_1 = m - 1 = 1$  (где  $m$  – число варьируемых факторов в опыте,  $m = 2$ ),  $v_2 = n - 2 = 25$  (где  $n$  – число вариантов в опыте,  $n = 27$ ) равно  $F_{\text{крит.}}(1; 25) = 4,2417$  [21]. Поскольку неравенство  $F_{30\%} > F_{\text{крит.}}$  соблюдено, то уравнение регрессии (2) статистически значимо.

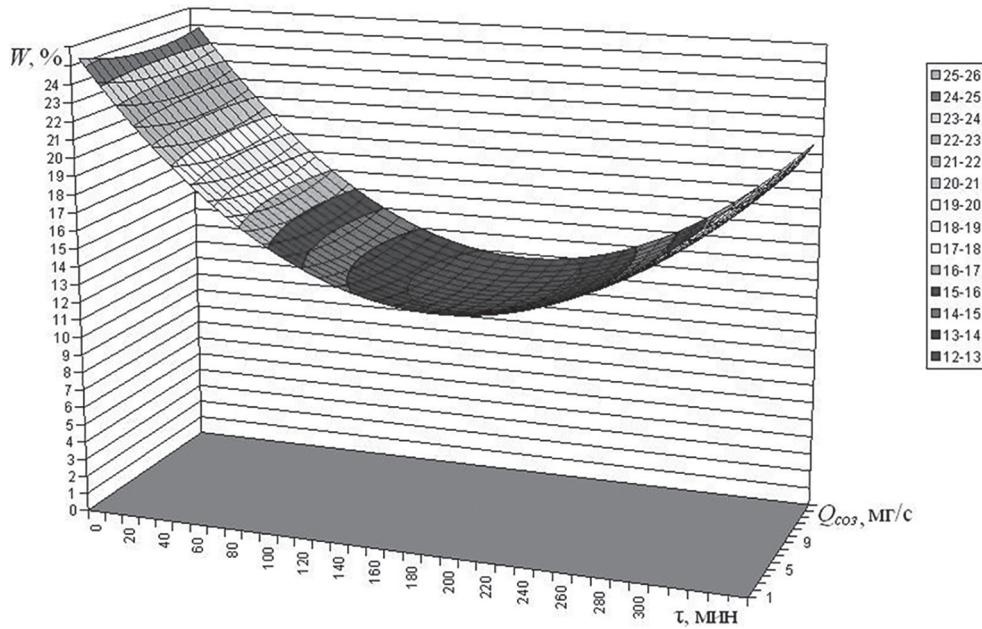
Обработка в программе Statistica данных эксперимента по исследованию электротехнологии конвективно-озоновоздушной сушки зерна с начальной влажностью  $W_{2h.z.} = 25 \%$  (2-й вариант процесса) позволила построить поверхность отклика, которая показана на

рис. 4 и имеет такой же единственный четко выраженным минимумом, как и у функции  $W_3^{30\%} = f(Q_{\text{оз}}, \tau)$  в предыдущем опыте. Полученная 3D-зависимость процесса снижения влажности зерна математически описывается уравнением регрессии второго порядка:

$$W_3^{25\%} = 25,62645 - 0,22697 \cdot Q_{\text{оз}} - 0,12442 \cdot \tau + 0,01176 \cdot Q_{\text{оз}}^2 + 0,00032 \cdot \tau^2. \quad (3)$$

Адекватность разработанной аналитической модели процесса сушки (3) оценивали путем вычисления критерия Фишера по В.М. Гусарову [20, 21] для ряда экспериментальных данных, полученных в опыте, и сравнения его с критическим (табличным) значением  $F$ -критерия. Расчетная величина критерия Фишера составила  $F_{25\%} = 9734,81$ , критическое значение  $F$ -критерия для принятого уровня значимости 0,05 и чисел степеней свободы  $v_1 = 1$ ,  $v_2 = 25 - F_{\text{крит.}}(1; 25) = 4,2417$  [21]. Поскольку неравенство  $F_{25\%} > F_{\text{крит.}}$  соблюдено, то уравнение регрессии (3) является статистически значимым.

В результате компьютерной статистической обработки опытных данных, которые собраны в ходе исследования способа конвективно-озоновоздушной сушки зерна с начальной влажностью  $W_{3h.z.} = 20 \%$  (3-й вариант процесса), получено уравнение регрессии второго порядка:



**Рис. 4. Поверхность отклика, описывающая процесс конвективно-озоновоздушной сушки 1 м<sup>3</sup> зерна с начальной влажностью  $W_{20\%} = 25 \%$**

$$W_3^{20\%} = 18,78002 - 0,04674 \cdot Q_{\text{co}3} - 0,07337 \cdot \tau - 0,00224 \cdot Q_{\text{co}3}^2 + 0,00021 \cdot \tau^2. \quad (4)$$

Данное уравнение представляет собой аналитическую модель процесса снижения влажности зерна  $W_3^{20\%} = f(Q_{\text{co}3}, \tau)$ . Поскольку поверхность отклика, математически описываемая уравнением (4) [17], не имеет экстремальных точек и представляет собой последовательно снижающуюся функцию влажности зерна ( $W = W_3^{20\%}$ , %) в зависимости от варьируемых в опыте факторов процесса, достаточно типичной формы для классических способов сушки зерновых культур (конвективного, кондуктивного, активного вентилирования и др.). Ее графическая интерпретация в статье не приводится.

Для проверки адекватности разработанного уравнения регрессии (4) вычисляли по методике В.М. Гусарова [20, 21] расчетное значение критерия Фишера, которое для экспериментальных данных исследованного процесса комбинированной сушки зерна 20%-й влажности составляет  $F_{20\%} = 4903,25$ , при этом критическое (табличное) значение  $F$ -критерия для уровня значимости 0,05 и чисел степеней свободы  $v_1 = 1$ ,  $v_2 = 25$  принималось равным  $F_{\text{крит.}}(1; 25) = 4,2417$  [21]. Сравнение найденного расчетного и критического критериев Фишера по-

казалось, что соблюдено требуемое неравенство между ними:  $F_{20\%} > F_{\text{крит.}}$ , которое подтверждает статистическую значимость уравнения (4).

Для отыскания значения минимальной влажности высушиваемого зерна при различных режимах комбинированной конвективно-озоновоздушной сушки полученные функции (зависимости) двух переменных для разных начальных влажностей обрабатываемого зерна (2), (3), (4) были исследованы на экстремум [18].

В общем виде уравнения регрессии (2), (3) и (4) могут быть записаны в виде уравнения:

$$W = a_0 + a_1 \cdot Q_{\text{co}3} + a_2 \cdot \tau + a_3 \cdot Q_{\text{co}3}^2 + a_4 \cdot \tau^2. \quad (5)$$

Для уравнения (5) находились первые частные производные по каждой переменной:

$$W'_Q = a_1 + 2 \cdot a_3 \cdot Q_{\text{co}3}, \quad (6)$$

$$W'_{\tau} = a_2 + 2 \cdot a_4 \cdot \tau. \quad (7)$$

Для поиска корней системы уравнений найденные частные производные (6) и (7) приравнивались к нулю

$$\begin{cases} a_1 + 2 \cdot a_3 \cdot Q_{\text{co}3} = 0, \\ a_2 + 2 \cdot a_4 \cdot \tau = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Технологический параметр подачи озона на 1 м<sup>3</sup> высушиваемого зерна выражался из первого уравнения системы (8):

$$Q_{\text{co}3} = -\frac{a_1}{2 \cdot a_3}, \quad (9)$$

а продолжительность конвективно-озоновоздушной сушки зерна выводилась из второго уравнения системы (8):

$$\tau = -\frac{a_2}{2 \cdot a_4}. \quad (10)$$

В результате проведения вычислений по формулам (9) и (10) получали стационарную точку экстремума с координатами  $P = (Q_{\text{оз}}, \tau)$  для конкретных экспериментальных данных исследуемых вариантов процесса сушки и построенных по ним уравнениям регрессии (2), (3) и (4).

В первую очередь рассчитывались координаты минимальной точки влажности зернового материала  $P_1 = W_3^{30 \% \text{ min}} = (Q_{\text{оз}}^{30 \% \text{ min}}, \tau_{30 \% \text{ min}})$  для поверхности отклика, построенной по данным исследования процесса конвективно-озоновоздушной сушки зерна с начальной влажностью  $W_{1,\text{н.з.}} = 30 \%$ . Для этого коэффициенты  $a_1 = -0,13922$  и  $a_3 = 0,00423$  из уравнения (2) подставляли в формулу (9), а коэффициенты  $a_2 = -0,12442$  и  $a_4 = 0,00032$  – в формулу (10). В результате вычислений получили:  $Q_{\text{оз}}^{30 \% \text{ min}} = 16,46 \text{ мг/с}$ ,  $\tau_{30 \% \text{ min}} = 251,1 \text{ мин}$ . При подстановке значений  $Q_{\text{оз}}^{30 \% \text{ min}}$  и  $\tau_{30 \% \text{ min}}$  в формулу (2) находили минимальное значение влажности зерна  $W_3^{30 \% \text{ min}} = 14,93 \%$ .

Аналогичным образом проводился расчет координат минимальной точки влажности зерна  $P_2 = W_3^{25 \% \text{ min}} = (Q_{\text{оз}}^{25 \% \text{ min}}, \tau_{25 \% \text{ min}})$  для поверхности отклика, построенной по данным исследования процесса двухэтапной высокотемпературной конвективной и озоновоздушной сушки зерна с начальной влажностью  $W_{2,\text{н.з.}} = 25 \%$ . Только для этого в формулу (9) подставляли коэффициенты  $a_1 = -0,22697$  и  $a_3 = 0,01176$  из уравнения (3), а в формулу (10) – коэффициенты  $a_2 = -0,12442$  и  $a_4 = 0,00032$  и в результате вычислений получили:  $Q_{\text{оз}}^{25 \% \text{ min}} = 9,65 \text{ мг/с}$ ,  $\tau_{25 \% \text{ min}} = 194,4 \text{ мин}$ . При подстановке значений  $Q_{\text{оз}}^{25 \% \text{ min}}$  и  $\tau_{25 \% \text{ min}}$  в формулу (3) и выполнения по ней вычислений находили минимальное значение влажности зерна, которое составило  $W_3^{25 \% \text{ min}} = 12,44 \%$ .

Анализ найденных по регрессионным математическим моделям (2) и (3) оптимальных режимов комбинированной электрофизической сушки зерна с начальными влажностями 30 и 25 %, показал, что полученное время снижения содержания избыточной влаги в материале в исследованных процессах составило:  $\tau_{30 \% \text{ min}} = 251,1 \text{ мин}$  и  $\tau_{25 \% \text{ min}} = 194,4 \text{ мин}$ , соответственно, и что оно (время) избыточно велико

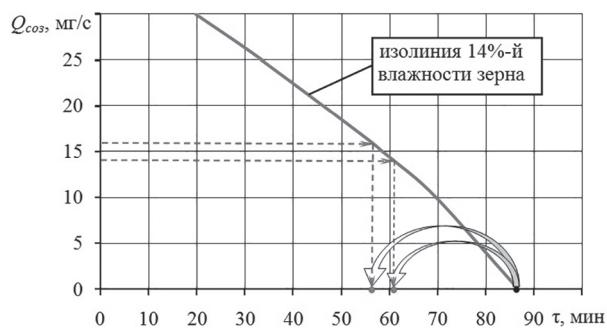
для поточных способов сушки, при которых обрабатываемое нагретым и озонированным воздухом зерно должно в непрерывном режиме перемещаться через рабочую камеру сушильной установки и за это время достигать кондиционной влажности ( $W_3^{\text{конд.}} = 14 \%$  [22, 23]). Причина большой продолжительности влагосъема отчасти связана с особенностями проведения экспериментальных исследований процессов конвективно-озоновоздушной сушки, которые состояли в том, что только короткий промежуток времени на этапе обработки неподогретым озонированным воздухом (2-й этап) высушиваемый материал в установке «ЭЛЕКТА-1» перемещался в плотном вертикальном слое, характерном для поточных способов сушки, а большую часть времени опыта зерно находилось в стационарном слое, из-за чего и была получена значительная величина  $\tau_{30 \% \text{ min}}$ ,  $\tau_{25 \% \text{ min}}$ . Основным путем сокращения в рассматриваемом случае продолжительности процесса комбинированной сушки в целом и этапа озоно-воздушной обработки в частности является выполнение не только на этапе высокотемпературной конвективной сушки (1-й этап процесса) нагрева зерна, но и существенного снижения его влажности (не менее чем 50 % от необходимой величины влагосъема). Следует отметить, что повышения энергозатрат на комбинированную сушку за счет увеличения в ней времени этапа тепловой конвективной обработки не произойдет, так как при высоких (более 22 %) начальных влажностях зерна (в нашем случае это 25 и 30 %) в нем содержится большое количество слабосвязанной поверхностной влаги, которая с высокой интенсивностью, пропорциональной величине подводимой тепловой энергии, и с низкими удельными энергозатратами удаляется в процессе конвективной сушки [23, 24] и одновременно позволяет достигнуть максимализации влагосъема на озоновоздушном этапе при сокращении энергопотребления на комбинированную электротехнологию снижения влажности в целом в соответствии с разработанным физическим механизмом протекания тепло-массообменных процессов в зерне при конвективно-озоновоздушной сушке [7, 8] и за счет рациональной технологической компоновки процесса [9, 10].

Для выявления рационального соотношения продолжительностей 1-го (конвективного) и 2-го (озоновоздушного) этапов и доли удаляемой избыточной влаги на каждом из них в составе комбинированного способа сушки необходимо

ходимо в дальнейшем проведение специальных экспериментальных исследований.

Расчет координат минимальной точки влажности зернового сырья  $P_3 = W_3^{20\% \min} = (Q_{coz}^{20\% \min}, \tau_{20\% \min})$  для уравнения регрессии (4), аналитически описывающего характер изменения функции  $W_3^{20\%} = f(Q_{coz}, \tau)$  и закономерности протекания процесса конвективно-озоновоздушной сушки зерна с начальной влажностью  $W_{3,н.з.} = 20\%$ , при подстановке коэффициентов  $a_1 = -0,04674$  и  $a_3 = -0,00224$  из выражения (4) в формулу (9), а коэффициентов  $a_2 = -0,07337$  и  $a_4 = 0,00021$  в формулу (10), показал по результатам вычислений, что величина подачи озона в  $1\text{ м}^3$  зерна ( $Q_{coz}^{20\% \min}$ ) получается отрицательной, а минимум регрессионной модели (4) при этом уходит в область мнимых значений. Таким образом, в условиях отсутствия минимума функции у модели (4) для проведения по ней расчетов по определению снижения продолжительности комбинированной сушки и сокращения энергозатрат на процесс в качестве минимальной конечной влажности зерна после обезвоживания принимаем рациональное ее значение, которым является кондиционная влажность, равная  $W_{3,кнд.} = W_{k.z.}^{20\% \ min} = 14\%$ , при которой ячмень может безопасно храниться длительное время без потерь качества [22, 23].

Для расчета величины снижения времени конвективно-озоновоздушной сушки зерна с начальной влажностью  $W_{3,н.з.} = 20\%$  по отношению к контролю на основе уравнения регрессии (4) построили показанный на рис. 5 график зависимости  $Q_{coz} = f(\tau)$  для всего диапазона варьируемых в опыте факторов, обеспечивающих получение действительных значений выходного параметра  $Q_{coz}$ .



**Рис. 5. График зависимости  $Q_{coz} = f(\tau)$  для расчета снижения времени сушки  $1\text{ м}^3$  зерна от начальной влажности  $W_{3,н.з.} = 20\%$  до конечной  $W_{k.z.} = 14\%$  (изолиния)**

Стандартными условиями по влагосъему для тепловых способов сушки является снижение относительной влажности зерна за один цикл процесса на  $\Delta W_{ст.з.} = 6\%$  от начальной влажности  $W_{3,н.з.} = 20\%$  до конечной  $W_{k.z.} = 14\%$  [5, 23]. Рациональными значениями подачи озона на  $1\text{ м}^3$  зерна от озонатора барьерного разряда в установке «ЭЛЕКТА-1» в рассматриваемом варианте процесса, согласно графика, представленного на рис. 5, являются  $Q_{coz}^{20\%} = 14-16\text{ мг/с}$ , при которых время сушки в контроле снижается с  $\tau_{контр.}^{20\%} = 86,6\text{ мин}$  до рациональных значений продолжительности комбинированного процесса в опыте  $\tau_{рап.}^{20\%} = 56,2-60,8\text{ мин}$ , то есть затраты времени на влагосъем уменьшаются на  $\Delta\tau_{конв.-OBC}^{20\%} = 30-35\%$ .

Учитывая, что вместе с уменьшением затрат времени на проведение конвективно-озоновоздушной сушки зерна ячменя с начальной влажностью  $W_{3,н.з.} = 20\%$  происходит снижение продолжительности работы энергоемких элементов сушильной установки «ЭЛЕКТА-1» (рис. 1, *а, б*), таких как привод вытяжного вентилятора (основной), ТЭНы, приводы вентиляторов работающих вместе с ТЭНами, приводы ворошителей, устройств транспортирования зерна из-под сушильных секций, загрузочного, возвратного и перегрузочного шнеков, при этом величина уменьшения энергозатрат на удаление влаги составляет  $\Delta\mathcal{E}_{з.з.у.}^{20\%} = 30-35\%$  [17, 24]. Кроме того, происходит сокращение энергоемкости сушки за счет рекуперации тепла со 2-го этапа комбинированного процесса ( $\Delta\mathcal{E}_{рек.} = \Delta\mathcal{E}_{20, 25, 30\%}^{20, 25, 30\%} = 5-10\%$  [17]), на котором через нагретое зерно продувается не-подогретый озонированный воздух. При этом выполняется предварительный нагрев теплоносителя (отработанной озоновоздушной смеси) для 1-го этапа сушки, который только после этого догревается до высокотемпературного состояния на ТЭНах и за счет термического разложения (идущего с выделением тепла) остаточного озона, не использованного на этапе обработки зерна ОВС [6, 10, 17]. Суммарное снижение энергозатрат на комбинированный процесс сушки зерна составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\Sigma}^{20\%} = \Delta\mathcal{E}_{з.з.у.}^{20\%} + \Delta\mathcal{E}_{рек.}^{20\%} = 35-40\%$ .

Для расчета величин уменьшения продолжительности высокотемпературной конвективной и озоновоздушной сушки зерна ячменя с начальными влажностями  $W_{1,н.з.} = 30\%$  и  $W_{2,н.з.} = 25\%$  по отношению к контролю построим с использованием уравнений регрессии (2)

и (3), соответственно, два контурных графика поверхностей отклика  $W_3^{30\%} = f(Q_{\text{coz}}, \tau)$ ,  $W_3^{25\%} = f(Q_{\text{coz}}, \tau)$  и выделим на каждом из них укрупненные графические элементы, показанные на рис. 6 и 7, на которых наиболее четко визуально отражается величина снижения затрат времени в рассматриваемом процессе комбинированной сушки при оптимальных для производственных условий режимах обработки зернового материала.

По результатам исследования на экстремум функции (2) было найдено, что оптимальным значением подачи озона на 1 м<sup>3</sup> зерна в процессе комбинированной сушки является  $Q_{\text{coz}}^{30\% \text{ min}} = 16,46 \text{ мг/с}$ . При этом, как показывают расчеты по уравнению (2), изменение величины подачи озона в диапазоне  $Q_{\text{coz}}^{30\%} = 14\text{--}19 \text{ мг/с}$  вызывает колебание показателя эффективности (в нашем случае времени удаления влаги) процесса конвективно-озоновоздушной обработки (рис. 6) не более чем на 0,1–0,3 %, что для практики несущественно, поэтому считаем, что сушка зерна в обозначенном интервале подач озона протекает на рациональных режимах. Затраты времени на комбинированное электрофизическое удаление влаги из зерна при 6%-м влагосъеме за один цикл процесса от начальной влажности  $W_{1\text{н.з.}} = 30\%$  до промежуточно-конечной влажности  $W_{k.z.}^{30\% \text{ (1 цикл)}} = 24\%$ , согласно анализу рис. 6, в контроле составляют  $\tau_{\text{контр.}}^{30\%} = 63 \text{ мин}$ , а при конвективно-озоновоздушной сушке на рациональных режимах —  $\tau_{\text{ран.(1 цикл)}}^{30\%} = 45,5 \text{ мин}$ , что соответствует

снижению времени на исследованный процесс на  $\Delta\tau_{\text{конв.-OVC}}^{30\%} = 28\%$ .

Уменьшение энергозатрат на удаление влаги в установке «ЭЛЕКТА-1», за счет полученного снижения продолжительности работы в ней энергопотребителей и возникновения технологических эффектов интенсификации влагопереноса в зерне и энергоэкономии в процессе сушки, составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\text{э.э.у.}}^{30\%} = 28\text{--}33\%$  [17, 24], а с учетом энергосбережения от рекуперации тепла с этапа воздействия на влажный зерновой материал озоновоздушной смеси (OVC), величина которого составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\text{рек.}}^{30\%} = 5\text{--}10\%$  [17], суммарное снижение энергозатрат на высокотемпературную конвективную и озоновоздушную сушку ячменя 30%-й начальной влажности составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\Sigma}^{30\%} = \Delta\mathcal{E}_{\text{э.э.у.}}^{30\%} + \Delta\mathcal{E}_{\text{рек.}}^{30\%} = 33\text{--}43\%$ .

Для определения величины сокращения продолжительности конвективно-озоновоздушной сушки зерна ячменя с начальной влажностью  $W_{2\text{н.з.}} = 25\%$ , по сравнению с контролем, за один стандартный цикл влагосъема, который составляет  $\Delta W_{\text{ст.з.}} = 6\%$ , принимаем, по результатам исследования на экстремум уравнения регрессии (3) и проверочных расчетов по нему на предмет снижения эффективности удаления влаги, что рациональный диапазон значений подачи озона на 1 м<sup>3</sup> зерна для рассматриваемого способа сушки равен  $Q_{\text{coz}}^{25\%} = 9\text{--}10 \text{ мг/с}$ . Для указанных режимов реализации процесса, согласно анализу данных по рис. 7, получаем, что продолжительность

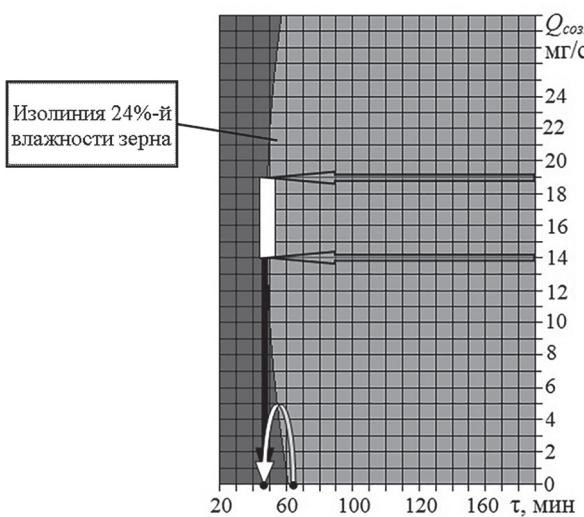


Рис. 6. Элемент контурного графика поверхности отклика  $W_3^{30\%} = f(Q_{\text{coz}}, \tau)$  для расчета снижения времени сушки 1 м<sup>3</sup> зерна с начальной влажностью  $W_{1\text{н.з.}} = 30\%$

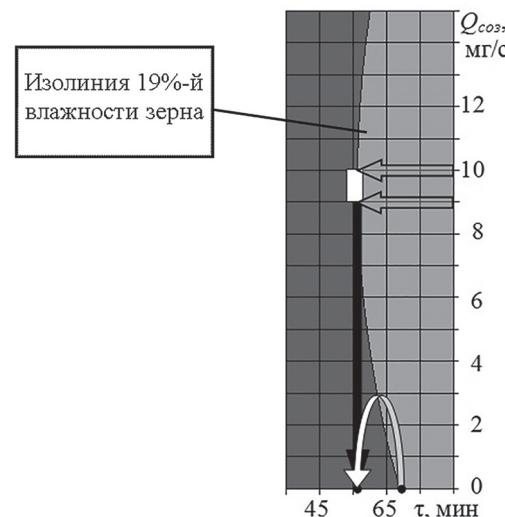


Рис. 7. Элемент контурного графика поверхности отклика  $W_3^{25\%} = f(Q_{\text{coz}}, \tau)$  для расчета снижения времени сушки 1 м<sup>3</sup> зерна с начальной влажностью  $W_{2\text{н.з.}} = 25\%$

снижения влажности зерна в контроле составляет  $\tau_{\text{контр.}}^{25\%} = 69$  мин, а время протекания комбинированной электрофизической сушки –  $\tau_{\text{рац. (1 цикл)}}^{25\%} = 56$  мин, что соответствует сокращению продолжительности процесса конвективно-озоновоздушной обработки на  $\Delta\tau_{\text{конв.-OBC}}^{25\%} = 19\%$ . С учетом этого уменьшение энергозатрат на удаление влаги из зерна с  $W_{2,н.з.} = 25\%$  в установке «ЭЛЕКТА-1», за счет сокращения времени работы энергоемкого оборудования зерносушилки и получения энергоэкономии от физико-технологических эффектов, возникающих в материале при комбинированном способе сушки, составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\text{э.э.у.}}^{25\%} = 19\text{--}25\%$  [17, 24]. С учетом величины энергосбережения от рекуперации тепла со 2-го этапа процесса конвективно-озоновоздушной обработки, равной  $\Delta\mathcal{E}_{\text{рек.}}^{25\%} = 5\text{--}10\%$  [17], получаем, что суммарное снижение энергозатрат на исследуемый вариант комбинированной электротехнологии сушки составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\Sigma}^{25\%} = \Delta\mathcal{E}_{\text{э.э.у.}}^{25\%} + \Delta\mathcal{E}_{\text{рек.}}^{25\%} = 24\text{--}35\%$ .

### Заключение

По результатам экспериментальных исследований на базе установки «ЭЛЕКТА-1» частного случая способа высокотемпературной конвективной и озоновоздушной сушки зерна ячменя для трех значений начальной влажности – 20, 25 и 30 % построены две поверхности отклика и три уравнения регрессии второго порядка вида  $W_3^{20\%, 25\%, 30\%} = f(Q_{\text{коz}}, \tau)$ , прошедшие проверку статистической значимости по  $F$ -критерию. Анализ регрессионных математических моделей конвективно-озоновоздушной сушки показал следующее:

- при 6%-м удалении влаги из зерна с начальной влажностью  $W_{3,н.з.} = 20\%$  при подаче озона в  $1\text{ м}^3$  материала  $Q_{\text{коz}}^{20\%} = 14\text{--}16\text{ мг/с}$  снижение продолжительности процесса обезвоживания по сравнению с контролем происходит на  $\Delta\tau_{\text{конв.-OBC}}^{20\%} = 30\text{--}35\%$ , а уменьшение энергоемкости сушки с учетом рекуперации тепла со 2-го этапа озоно-воздушной обработки составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\Sigma}^{20\%} = 35\text{--}40\%$ ;

- при 6%-м удалении влаги из зерна с начальной влажностью  $W_{2,н.з.} = 25\%$  при подаче озона в  $1\text{ м}^3$  материала  $Q_{\text{коz}}^{25\%} = 9\text{--}10\text{ мг/с}$  снижение продолжительности процесса происходит на  $\Delta\tau_{\text{конв.-OBC}}^{25\%} = 19\%$ , а уменьшение суммарных энергозатрат на сушку с учетом рекуперации тепла составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\Sigma}^{25\%} = 24\text{--}35\%$ .

– при 6%-м удалении влаги из зерна ячменя с начальной влажностью  $W_{1,н.з.} = 30\%$  и при подаче озона в  $1\text{ м}^3$  материала  $Q_{\text{коz}}^{30\%} = 14\text{--}19\text{ мг/с}$  снижение продолжительности процесса удаления влаги происходит на  $\Delta\tau_{\text{конв.-OBC}}^{30\%} = 28\%$ , а уменьшение суммарной энергоемкости сушки с учетом рекуперации тепла составляет  $\Delta\mathcal{E}_{\Sigma}^{30\%} = 33\text{--}43\%$ .

Рассматриваемый способ конвективно-озоновоздушной сушки зерна ячменя подтвердил свою высокую эффективность как по критерию интенсификации удаления влаги, так и по критерию снижения энергозатрат на процесс. Однако, как показали проведенные опыты в сравнении с лабораторными, потенциал исследованного варианта комбинированного способа сушки в части уменьшения продолжительности процесса, при полупоточной технологии исполнения реализуется далеко не полностью из-за остающихся довольно большими затрат времени на снижение содержания влаги в зерне от его начальных значений до кондиционной влажности.

В дальнейших исследованиях способа высокотемпературной конвективной и озоновоздушной сушки необходимо на 1-м этапе конвективной обработки не только нагревать материал, но и проводить его существенную подсушку, особенно для зерна с начальной влажностью 25 и 30 %. При этом для зернового материала с начальной влажностью 20 % кроме увеличения влагосъема на 1-м этапе процесса необходимы экспериментальные исследования конвективно-озоновоздушной сушки по использованию на 2-м этапе озоновоздушной обработки более высоких подач озона на  $1\text{ м}^3$  зерна, главным образом, за счет увеличения концентрации озона в ОВС.

### Литература

- Петриченко В.В. Августовский прогноз урожая зерна 2017 г. – 132 млн т (сверхрекорд) // Хлебопродукты. 2017. № 9. С. 4–5.
- Петриченко В.В. Июньский прогноз урожая зерна 2016 г. – рекорд – 110,1 млн т // Хлебопродукты. 2016. № 7. С. 6–8.
- Петриченко В.В. Июльский прогноз урожая зерна в России в 2015 г. // Хлебопродукты. 2015. № 9. С. 4–7.
- Петриченко В.В. Урожая зерна в России в 2014 г. – более 100 млн т // Хлебопродукты. 2014. № 9. С. 4–6.

5. Елизаров В.П., Антышев Н.М., Бейлис В.М. и др. Исходные требования на базовые машинные технологические операции в растениеводстве / М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. С. 140–143.
6. Способ сушки зерновых материалов: пат. № 2422741 РФ, МПК F26 B3/14 / В.И. Пахомов, В.А. Максименко, К.Н. Буханцов; заявитель и патентообладатель: ВНИПТИМЭСХ. № 2010106531/06, заявл.: 24.02.2010, опубл.: 27.06.2011, Бюл. № 18. 13 с.
7. Пахомов В.И., Буханцов К.Н., Максименко В.А. Двухэтапный комбинированный способ высокотемпературной сушки зерна. Ч. 1 // Хранение и переработка сельхозсырья. 2011. № 12. С. 56–60.
8. Пахомов В.И., Буханцов К.Н., Максименко В.А. Двухэтапный комбинированный способ высокотемпературной сушки зерна. Ч. 2 // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 1. С. 53–58.
9. Пахомов В.И., Максименко В.А., Буханцов К.Н. Энергосберегающая технология высокотемпературной конвективной сушки и озоновоздушной обработки зерна. Ч. 1 // Хранение и переработка сельхозсырья. 2013. № 5. С. 19–25.
10. Пахомов В.И., Максименко В.А., Буханцов К.Н. Энергосберегающая технология высокотемпературной конвективной сушки и озоновоздушной обработки зерна. Ч. 2 // Хранение и переработка сельхозсырья. 2013. № 6. С. 23–27.
11. Буханцов К.Н. Методика проведения экспериментальных исследований конвективно-озоновоздушной сушки зерновых материалов // Механизация технологических процессов в животноводстве: технологии, машины, оборудование: сб. науч. тр. 4-й Междунар. науч.-техн. конференции «Ресурсосберегающие технологии и инновационные проекты в АПК» (г. Зерноград Ростовской обл., ВНИПТИМЭСХ, 14–15 апреля 2009 г.). Зерноград, 2009. С. 265–276.
12. Проведение экспериментальных исследований фрагментов энергоэкономных электротехнологий и процессов обработки растительных сельскохозяйственных материалов с использованием электрофизических методов и разработка оптимизационной математической модели: отчет о НИР (промежуточ.): 09.02.02.01 / ВНИПТИМЭСХ; рук. В.Д. Каун. Зерноград, 2008. 46 с. № ГР 15070.7721019635.06.8.002.0.
13. Максименко В.А., Буханцов К.Н. Многофункциональная установка малой производительности для реализации электротехнологий послеуборочной и предпосевной обработки зерна и семян // О проблемах обеспечения в современных условиях количественной и качественной сохранности материальных ценностей, поставляемых и закладываемых в государственный резерв: сборник докладов Междунар. науч.-практ. конференции (г. Москва, ФГБУ НИИ проблем хранения Росрезерва, 5–6 сентября 2011 г.). М.: ООО «Галлея-Принт», 2011. Ч. 2. С. 158–168.
14. Пахомов В.И., Буханцов К.Н. Реализация технологий комбинированной сушки, обеззараживания и стимулирования посевных свойств зерна и семян на базе установки «ЭЛЕКТА-1» // Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве: материалы Междунар. науч.-практ. конференции (г. Минск, РУП НПЦ НАН Беларусь по механизации сельского хозяйства, 19–20 октября 2011 г.). Минск, 2011. Т. 1. С. 196–207.
15. Пахомов В.И., Максименко В.А., Буханцов К.Н. Рассмотрение возможности использования новой двухэтапной технологии высокотемпературной конвективной сушки и озоновоздушной обработки зерна на базе применяемых в производстве сушильных установок // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) – СЭТТ-2011: труды 4-й Междунар. науч.-практ. конференции (г. Москва, ФГБОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина, 20–23 сентября 2011 г.). М., 2011. Т. 2. С. 54–66.
16. Ванурин В.Н., Максименко В.А., Буханцов К.Н. Выбор привода отгрузочного шнека установки СВЧ-обеззараживания «СИГМА-1» // Вестник АПК Ставрополья. 2015. № 4. С. 18–23.
17. Проведение экспериментальных исследований по проверке эффективности перспективных энергосберегающих электротехнологий обработки растительных сельскохозяйственных материалов (бdioобъектов), уточнение параметрических зависимостей процесса сушки и разработка математической модели процесса сушки сельскохозяйственных культур: отчет о НИР (промежуточ.): 09.02.02.01 / ВНИПТИМЭСХ; рук. А.И. Пахомов. Зерноград, 2009. 59 с. № ГР 15070.7721019635.06.8.002.0. Инв. № 73-09.1.
18. Газалов В.С., Пономарева Н.Е., Беленов В.Н. Использование статистических методов при решении прикладных задач в сельскохозяйственном производстве: монография. Зерноград: ПМГ СКНИИМЭСХ, 2011. 74 с.
19. Грачева Н.Н., Руденко Н.Б., Кононенко А.Ф., Литвинов В.Н. Применение ЭВМ в агрономии. Зерноград: АЧИИ ФГБОУ ВО ДонГАУ, 2017. Ч. 2. Обработка и анализ экспериментальных данных. 152 с.

20. Гусаров В.М., Проява С.М. Общая теория статистики. М.: ЮНИТИ, 2008. 206 с.
21. Гусаров В.М., Кузнецова Е.И. Статистика. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. 479 с.
22. Горелова Е.И. Основы хранения зерна. М.: Агропромиздат, 1986. 136 с.
23. Жидко В.И., Резчиков В.А., Уколов В.С. Зерносушение и зерносушилки. М.: Колос, 1982. 239 с.
24. Птицын С.Д. Зерносушилки. Технологические основы, тепловой расчет и конструкции. М.: Машиностроение, 1966. 212 с.

## References

1. Petrichenko V.V. The August forecast for the 2017 grain harvest is 132 million tonnes (super-record). Hlebo-produkty. 2017. No 9, pp. 4–5 (in Russ.).
2. Petrichenko V.V. June grain harvest forecast for 2016 is a record of 110.1 million tons. Hleboprodukty. 2016. No 7, pp. 6–8 (in Russ.).
3. Petrichenko V.V. July forecast of grain harvest in Russia in 2015. Hleboprodukty. 2015. No 9, pp. 4–7 (in Russ.).
4. Petrichenko V.V. The grain harvest in Russia in 2014 is more than 100 million tons. Hleboprodukty. 2014. No 9, pp. 4–6 (in Russ.).
5. Elizarov V.P., Antyshev N.M., Bejlis V.M. Iskhodnye trebovaniya na bazovye mashinnye tekhnologicheskie operacii v rastenievodstve [Baseline requirements for basic machine process operations in crop production]. Mos-cow: FGNU «Rosinformagrotekh» Publ., 2005, pp. 140–143.
6. Sposob sushki zernovyh materialov [The method of drying grain materials]: patent No 2422741 RF, MPK F26 V3/14. V.I. Pahomov, V.A. Maksimenko, K.N. Buhancov; zayavitel' i patentoobladatel': VNIPTIMEHSKH. No 2010106531/06, zayavl.: 24.02.2010, opubl.: 27.06.2011, Byul. No 18. 13 p.
7. Pahomov V.I., Buhancov K.N., Maksimenko V.A. Two-stage combined method of high-temperature grain drying. CH. 1. Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya. 2011. No 12, pp. 56–60 (in Russ.).
8. Pahomov V.I., Buhancov K.N., Maksimenko V.A. Two-stage combined method of high-temperature grain drying. CH. 2. Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya. 2012. No 1, pp. 53–58 (in Russ.).
9. Pahomov V.I., Maksimenko V.A., Buhancov K.N. Energy-saving technology of high-temperature convective drying and ozone-air grain processing. CH. 1. Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya. 2013. No 5, pp. 19–25 (in Russ.).
10. Pahomov V.I., Maksimenko V.A., Buhancov K.N. Energy-saving technology of high-temperature convective drying and ozone-air grain processing. CH. 2. Hranenie i pererabotka sel'hozsyrya. 2013. No 6, pp. 23–27 (in Russ.).
11. Buhancov K.N. Methods of conducting experimental studies of convective ozone-air drying of grain materials. Mekhanizaciya tekhnologicheskikh processov v zhivotnovodstve: tekhnologii, mashiny, oborudovanie: Sb. nauch. tr. 4-j Mezhdunar. nauch.-tekhn. konferencii: «Resursosberegayushchie tekhnologii i innovacionnye proekty v APK» [Mechanization of technological processes in animal husbandry: technology, machinery, equipment: Collectrion of scientific articles of 4th International scientific and technical conference: «Resource-saving technologies and innovative projects in agriculture»] (g. Zernograd Rostovskoj obl., VNIPTIMEHSKH, 14–15 aprelya 2009 g.). Zernograd, 2009, pp. 265–276 (in Russ.).
12. Provedenie eksperimental'nyh issledovanij fragmentov ehnergoehkonomnyh ehlektrotehnologij i processov obrabotki rastitel'nyh sel'skohozyajstvennyh materialov s ispol'zovaniem ehlektrofizicheskikh metodov i razrabotka optimizacionnoj matematicheskoj modeli [Conducting experimental studies of fragments of energy-saving electrical technologies and the processing of plant-based agricultural materials using electrophysical methods and the development of an optimization mathematical model]: otchet o NIR (pomezhutoch.): 09.02.02.01/ VNIPTIMEHSKH; ruk. Kaun V.D. Zernograd, 2008. 46 p. № GR 15070.7721019635.06.8.002.0.
13. Maksimenko V.A., Buhancov K.N. Multifunctional low-capacity plant for the implementation of electrical technologies of post-harvest and presowing treatment of grain and seeds. O problemah obescheniya v sovremennyh usloviyah kolichestvennoj i kachestvennoj sohrannosti material'nyh cennostej, postavlyayemyh i zakladyvaemyh v gosudarstvennyj rezerv: sbornik dokladov Mezhdunar. nauch.-prakt. konferencii (g. Moskva, FGBU NII problem hraneniya Rosrezerva, 5–6 sentyabrya 2011 g.) [The problems of ensuring in modern conditions the quantitative and qualitative safety of material values supplied and pledged to the state reserve: a collection of reports of the In-tern. scientific and practical conference (Moscow, Federal Research Institute of Storage Problems of the Federal Reserve, September 5-6, 2011)]. Moscow: OOO "Galleya-Print" Publ., 2011. CH. 2, pp. 158–168 (in Russ.).
14. Pahomov V.I., Buhancov K.N. Implementation of combined drying technologies, disinfection and stimulation of the sowing properties of grain and seeds based on "ELEKTA-1" device. Nauchno-tehnicheskij progress v sel'sko-hozyajstvennom

- proizvodstve: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konferencii (g. Minsk, RUP NPC NAN Belarusi po mekhanizacii sel'skogo hozyajstva, 19–20 oktyabrya 2011 g.) [Scientific and technical progress in agricultural production: materials of the Intern. scientific and practical conference (Minsk, Scientific and Practical Center for Agricultural Mechanization of the National Academy of Sciences of Belarus, October 19-20, 2011]. Minsk, 2011. Vol. 1, pp. 196–207 (in Russ.).
15. Pahomov V.I., Maksimenko V.A., Buhancov K.N. Consideration of the possibility of using a new two-stage technology of high-temperature convective drying and ozone-air processing of grain based on drying equipment used in the production. Sovremennye ehnergosberegayushchie teplovye tekhnologii (sushka i termovlazhnostnaya obrabotka materialov) – SEHTT-2011: Trudy 4-j Mezhdunar. nauch.-prakt. konferencii (g. Moskva, FGBOU VPO MGAU im. V.P. Goryachkina, 20–23 sentyabrya 2011 g.) [Modern energy-saving thermal technologies (drying and heat and moisture treatment of materials) – SETT-2011. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference (Moscow, Moscow State Agro-Engineering University, September 20-23, 2011]. Moscow, 2011. Vol. 2, pp. 54–66 (in Russ.).
16. Vanurin V.N., Maksimenko V.A., Buhancov K.N. Selection of the drive of the discharge screw of the «SIGMA-1» microwave disinfection unit. Vestnik APK Stavropol'ya. 2015. No 4, pp. 18–23 (in Russ.).
17. Provedenie chksperimental'nyh issledovanij po proverke ehffektivnosti perspektivnyh ehnergosberegayushchih ehlektrotehnologij obrabotki rastitel'nyh sel'skohozyajstvennyh materialov (bioobektov), utochenie parametricheskikh zavisimostej processa sushki i razrabotka matematicheskoy modeli processa sushki sel'skohozyajstvennyh kul'tur [Conducting experimental studies to verify the effectiveness of promising energy-saving electrical technologies for processing plant-based agricultural materials (bioobjects), clarifying the parametric dependencies of the drying process and developing a mathematical model of the process of drying agricultural crops]: otchet o NIR (promezhutoch.): 09.02.02.01/ VNIPTIMEHSKH; ruk. Pahomov A.I. Zernograd, 2009. 59 p. № GR 15070.7721019635.06.8.002.0. Inv. No 73-09.1.
18. Gazalov V.S., Ponomaryova N.E., Belenov V.N. Ispol'zovanie statisticheskikh metodov pri reshenii prikladnyh zadach v sel'skohozyajstvennom proizvodstve [The use of statistical methods in solving applied problems in agricultural production]. Monografiya. Zernograd: PMG SKNIIMEHSKH Publ., 2011. 74 p.
19. Gracheva N.N., Rudenko N.B., Kononenko A.F., Litvinov V.N. Primenenie EHVM v agronomii [The use of computers in agronomy]. Zernograd: ACHII FGBOU VO DonGAU, 2017. CH. 2. Obrabotka i analiz chksperimental'nyh dannyh. 152 p.
20. Gusarov V.M., Proyava S.M. Obshchaya teoriya statistiki [General theory of statistics]. Moscow: YUNITI Publ., 2008. 206 p.
21. Gusarov V.M., Kuznecova E.I. Statistika [Statistics]. Moscow: YUNITI-DANA Publ., 2007. 479 p.
22. Gorelova E.I. Osnovy hranieniya zerna [Basics of grain storage]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1986. 136 p.
23. Zhidko V.I., Rezhikov V.A., Ukolov V.S. Zernosushenie i zernosushilki [Grain drying and grain dryers]. Moscow: Kolos Publ., 1982. 239 p.
24. Pticyn S.D. Zernosushilki. Tekhnologicheskie osnovy, teplovoj raschet i konstrukcii [Technological basis, thermal calculation and design]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1966. 212 p.

