ISSN 2073-7599

Сельскохозяйственные машины и технологии

№ 4 2017

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МЕТОДЫ И СПОСОБЫ СУШКИ ЗЕРНА

ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩАЯ ТЕХНИКА И ОБОРУДОВАНИЕ

ВОЗДЕЛЫВАНИЕ ЛЬНА В РОССИИ

О КОНКУРСАХ НА СОИСКАНИЕ ЗОЛОТЫХ МЕДАЛЕЙ ИМЕНИ ВЫДАЮЩИХСЯ УЧЕНЫХ, ПРОВОДИМЫХ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИЕЙ НАУК В 2018 ГОДУ

Российская академия наук объявляет конкурсы на соискание следующих золотых медалей имени выдающихся ученых, каждая из которых присуждается в знаменательную дату, связанную с жизнью и деятельностью ученого, именем которого названа медаль.

ЗОЛОТЫЕ МЕДАЛИ

(присуждаются отечественным ученым)

Золотая медаль имени В.П. Горячкина – за выдающиеся работы в области земледельческой механики и механизации сельского хозяйства.
Срок представления работ до 29 октября 2017 года.

Золотая медаль имени В.Р. Вильямса – за выдающиеся работы в области общего земледелия и кормопроизводства.
Срок представления работ до 9 июля 2018 года.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В целях поощрения ученых за научные труды, научные открытия и изобретения, имеющие важное значение для науки и практики, Российская академия наук присуждает золотые медали и премии имени выдающихся ученых.

Золотые медали присуждаются за выдающиеся научные работы, открытия и изобретения или по совокупности работ большого научного и практического значения.

В конкурсах на соискание золотых медалей могут участвовать лишь отдельные лица персонально.

Право выдвижения кандидатов на соискание золотых медалей предоставляется:

а) академикам и членам-корреспондентам Российской академии наук;

б) научным учреждениям, высшим учебным заведениям;

в) научным и инженерно-техническим обществам;

г) научным советам Российской академии наук и других ведомств по важнейшим проблемам науки;

д) научно-техническим советам государственных комитетов, министерств, ведомств;

техническим советам промышленных предприятий; конструкторским бюро.

Организации или отдельные лица, выдвинувшие кандидата на соискание золотой медали, обязаны представить в Российскую академию наук (119991, Москва, Ленинский проспект, 14, корп. 2, Экспедиция) с надписью «На соискание золотой медали имени...»:

а) мотивированное представление, включающее научную характеристику работы, ее значение для развития науки и народного хозяйства;

б) при выдвижении работ на соискание премии - опубликованную научную работу (серию работ), материалы научного открытия или изобретения - в трех экземплярах (при выдвижении закрытых работ допускается представление рукописных материалов в одном экземпляре);

Примечание: При выдвижении кандидата на соискание золотой медали представление опубликованных научных работ (серий работ), материалов научного открытия или изобретения не обязательно.

в) сведения об авторе (перечень основных научных работ, открытий, изобретений, место работы и занимаемая должность, домашний адрес, номера служебного и домашнего телефонов);

г) справку о том, что представляемая на конкурс работа ранее не была удостоена Государственной премии, а также именных государственных премий (справка выдается на бланке учреждения за подписью начальника отдела кадров или ученого секретаря. Если отдел кадров учреждения такую справку не выдает по каким-то причинам, тогда к документам прикладывается заверенная копия трудовой книжки).

Работы, удостоенные государственной премии, а также именных государственных премий, на соискание золотых медалей и премий имени выдающихся ученых не принимаются.

Ученым, удостоенным золотых медалей, предоставляется право при печатании работ отмечать в заголовке «Удостоена золотой медали (премии) имени...Российской академии наук за...год».

Решения президиума РАН о присуждении золотых медалей, а также краткие аннотации о работах, удостоенных золотых медалей или премий, публикуются в «Вестнике Российской академии наук», в «Известиях Российской академии наук» соответствующей серии и в газете «Поиск». В «Вестнике Российской академии наук» помещаются портреты ученых, удостоенных золотых медалей и премий.

Рассмотренные на заседании президиума РАН печатные научные работы, за которые присуждены золотые медали, передаются в Библиотеку Российской академии наук на хранение.

Золотые медали, а также дипломы о присуждении золотых медалей вручаются удостоенным их лицам на годичном общем собрании членов РАН. Дипломы о присуждении премий вручаются удостоенным их лицам на заседании президиума РАН.

Справки по телефону: (499) 237-99-33

Сельскохозяйственные МАШИНЫ и ТЕХНОЛОГИИ

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ АГРОИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР ВИМ»

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР)
Свидетельство ПИ № ФС77-68608 от 3 февраля 2017 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
В.А.Колесникова,
канд. техн. наук, заслуженный работник сельского хозяйства РФ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ:

В.В.Альт, *академик РАН,*
М.Н.Ерохин, *академик РАН,*
Ю.А.Иванов, *академик РАН,*
А.Ю.Измайлов, *академик РАН,*
И.М.Куликов, *академик РАН,*
Ю.Ф.Лачуга, *академик РАН,*
Я.П.Лобачевский, *член-корр. РАН,*
В.Д.Попов, *академик РАН,*
Д.С.Стребков, *академик РАН,*
В.И.Черноиванов, *академик РАН,*

ИНОСТРАННЫЕ ЧЛЕНЫ РЕДКОЛЛЕГИИ:

Х.И.Белоев, *член-корр. БАН Болгария, Русе*
В.И.Кравчук, *член-корр. НААН Украины, Киев*
А.Мачалек, *к.т.н., НИИСТ, Чехия, Прага*
Т.Павловски, *д.т.н., проф., ПИМР, Польша, Познань*
Ж.С.Садыков, *д.т.н., проф., Казахстан, Алматы*
С.Г.Яковчик, *к.с.-х.н., НПЦ НАН Беларуси, Минск*

НАД НОМЕРОМ РАБОТАЛИ:

В.В.Бижаев
С.В.Гришуткина
Р.М.Нурбагандова

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
109428, Москва,
1-й Институтский проезд, 5
Телефоны: **(499) 174-88-11**
(499) 174-89-01
E-mail: **smit@vim.ru**

Отпечатано в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Формат 205 х 290 мм
Подписано в печать 15.07.2017
Тираж 500 экз.

Журнал включен в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации трудов соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук

СОДЕРЖАНИЕ

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ

Голубкович А.В., Дадыко А.Н.
Приближенная модель сушки влажной частицы 3

Павлов С.А., Дадыко А.Н.
Особенности сушки зерна при использовании топочных блоков на твердом топливе 9

Юферев Л.Ю.
Особенности работы однопроводных электросетей повышенной частоты 14

Черников В.Г., Ростовцев Р.А.
Определение параметра интенсивности отрыва коробочек льна при работе очесывающего устройства 20

Кузьмин В.А., Федоткин Р.С., Крючков В.А.
Искусственная нейронная сеть для обоснования параметров ходовых систем тракторов 24

ПОЧВООБРАБОТКА

Руденко Н.Е., Носов И.А., Кайванов С.Д., Петухов Д.А.
Ресурсосберегающий пропашной культиватор 31

Лискин И.В., Миронов Д.А., Курбанов Р.К.
Обоснование параметров искусственной почвенной среды для лабораторного исследования изнашивания лезвия 37

РАСТЕНИЕВОДСТВО

Голубев В.В., Кудрявцев А.В., Фирсов А.С., Сафонов М.А.
Методика проведения агротехнического полевого опыта 43

Журнал включен в список периодических изданий Международной базы данных AGRIS

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ). Полные тексты статей размещены на сайте электронной научной библиотеки: elibrary.ru

SCIENTIFIC-TEORETICAL JOURNAL

[SEL'SKOKHOZYAYSTVENNYE MASHINY I TEKHNOLOGII]

The journal is registered by Federal Agency of supervision of legislation observance of mass communications sphere and cultural heritage protection

Certificate ПИ № ФС77-68608 from February, 3rd, 2017

Founder and publisher: Federal State Budgetary Scientific Institution «Federal Scientific Agroengineering Center VIM» of Russian Academy of Science

EDITOR-IN-CHIEF
Kolesnikova V.A.

EDITORIAL BOARD:

Al't V.V. – member of RAS
Erokhin M.N. – member of RAS
Ivanov Yu.A. – member of RAS
Izmaylov A.Yu. – member of RAS
Lachuga Yu.F. – member of RAS
Lobachevskiy Ya.P. – corr.member of RAS,
Popov V.D. – member of RAS
Strebkov D.S. – member of RAS
Chernoivanov V.I. – member of RAS

EDITORIAL BOARD FOREIGN MEMBERS:

Beloev H.I. – corr.member of BAS, Bulgaria, Ruse
Kravchuk V.I. – corr.member of NAAS of Ukraine, Kiev
Machalek A. – Ph.D.(Eng.), VUZT, Chechia, Prague
Pavlovski T. – D.Sc.(Eng.), prof., PIMR Poland, Poznan
Sadykov Zh.S. – D.Sc.(Eng.), prof., Kazakhstan, Almaty
Yakovchik S.G. – Ph.D.(Agr.), SPC of NAS of Belarus, Minsk

THEY WORKED WITH JOURNAL ISSUE:
Bizhaev V.V.
Grishutkina S.V.
Nurbagandova R.M.

EDITORS OFFICE'S ADDRESS
109428, Moscow,
1st Institutskiy proezd, 5
Tel.: +7 (499) 174-88-11
+7 (499) 174-89-01
E-mail: smit@vim.ru

Printed by FSAC VIM Russian Academy of Science

The journal is included in the Russian Index of Scientific Citation (RISC). Full texts of articles are placed on the website of electronic library: elibrary.ru

The format is 205 × 290 mm
Passed for printing 15.07.2017
The circulation is 500 copies

CONTENTS

NEW TECHNICS AND TECHNOLOGIES

Golubkovich A.V., Dadyko A.N.
Approximate model of wet particle drying 3

Pavlov S.A., Dadyko A.N.
Features of grain drying using solid fuel furnace blocks 9

Yuferev L.Yu.
Operation peculiarities of single-wire high frequency power transmission lines 14

Chernikov V.G., Rostovtsev R.A.
Determination of parameter of intensity of flax balls separation during comb deseeder operation 20

Kuz'min V.A., Fedotkin R.S., Kryuchkov V.A.
Artificial neural network applying for justification of tractors undercarriages parame-ters 24

SOIL CULTIVATION

Rudenko N.E., Nosov I.A., Kayvanov S.D., Petukhov D.A.
Resource-saving inter-row cultivator 31

Liskin I.V., Mironov D.A., Kurbanov R.K.
Justification of parameters artificial soil for laboratory research of cutting edge wear 37

PLANT GROWING

Golubev V.V., Kudryavtsev A.V., Firsov A.S., Safonov M.A.
Technique of agrotechnical field experiment 43

The journal is included in the periodical editions list of the International data base AGRIS

Редакция журнала не несет ответственности за информацию, содержащуюся в статьях.
Перепечатка материалов, опубликованных в журнале, допускается только с разрешения редакции.

УДК 621.18 DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-3-8

ПРИБЛИЖЕННАЯ МОДЕЛЬ СУШКИ ВЛАЖНОЙ ЧАСТИЦЫ

Голубкович А.В.*,
докт. техн. наук;

Дадыко А.Н.,
аспирант

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 1-й Институтский проезд, 5, Москва, 109428, Российская Федерация, *e-mail: vim@vim.ru

При сжигании растительных отходов процесс сушки топлива переносится в топочную камеру. Сушка крупных частиц топлива с самого начала протекает в периоде падающей скорости процесса, сопровождается углублением фронта испарения внутрь материала, выделением, зажиганием летучих компонентов и коксового остатка. Выявили, что в условиях конвективного и лучистого теплообмена с дымовыми газами, находящимися при высокой температуре, частица практически сразу же прогревается до температуры кипения воды. При этом начинается процесс интенсивного испарения влаги, фронт которого с течением времени перемещается вглубь материала. Внутри частицы образуются «сухая» и «мокрая» зоны. В процессе углубления зоны испарения начинается прогрев, выделение летучих компонентов и их воспламенение в «сухой» зоне. Отметили, что для случая горения в топке крупной частицы влажного топлива радиусом более 1 мм в предлагаемой модели предусмотрены три периода сушки: до воспламенения летучих компонентов; видимого горения летучих компонентов до воспламенения кокса на поверхности; сушки, протекающей параллельно с выгоранием кокса. Каждому из этих периодов соответствует определенное положение зоны испарения, по которому можно рассчитать остаточное влагосодержание частицы и длительность сушки. Определили, что суммарное время сушки представляет собой длительность зажигания частицы. Рассчитали процессы сушки и зажигания частиц с разной начальной влажностью и при различных условиях теплоотдачи. Установили, что в крупной влажной частице растительных отходов при поступлении в топочную камеру одновременно происходят процессы сушки, выделения и воспламенения летучих компонентов, а также и горения коксового остатка. Показали, что длительность зажигания определяется временем окончания горения коксового остатка и может быть рассчитана по выражению полного высушивания частицы. В топочном блоке ТБР-2,0 сушка и зажигание влажных мягких частиц растительных остатков радиусом менее 0,25 мм происходит менее чем за 2 с, сушка с последующим зажиганием частиц радиусом 1-3 мм занимает до 30 с.

Ключевые слова: растительные отходы, сжигание, сушка, длительность зажигания частицы.

Для цитирования: Голубкович А.В. Дадыко А.Н. Приближенная модель сушки влажной частицы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N4. С. 3-8

APPROXIMATE MODEL OF WET PARTICLE DRYING

Golubkovich A.V.*,
Dr. Sc. (Eng.);

Dadyko A.N.

Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, 109428, Russian Federation, *e-mail: vim@vim.ru

When plant refuse burning process of drying of fuel is transferred to the furnace camera. Drying of large particles of fuel from the very beginning proceeds in the period of the drooping combustion rate. At the same time the front of evaporation goes deep in material, volatile components and coke residual are separated and firing. In the conditions of convective and radiant heat exchange with the combustion gases which are in case of high temperature, the particle practically at once gets warm to a water boiling temperature. At the same time process of intensive evaporation of moisture which front moves deep into material begins. «Dry» and «wet» zones are formed in a particle. Warming up, separation of volatile components and their inflaming in «dry» zone begin in the course of a deepening of evaporation zone. Three periods of drying are provided for burning of a large particle of the wet fuel with a radius more than 1 mm: before inflaming of volatile components; visible burning of volatile components before inflaming of coke on a surface; the drying proceeding in parallel with coke burning-off. A certain location of an evaporation zone corresponds to each of these periods. And we can calculate particle dryness and drying duration. Summary time of drying represents duration of particle ignition. Processes of particles drying and ignition with different initial humidity and under various conditions of a heat emission were calculated. Drying, separation

and inflaming of volatile components, as well as burning of coke residual take place at the same time in a large wet particle of plant refuse in case of arrival into the furnace camera. Duration of ignition is defined by end time of burning of coke residual and can be calculated according to complete drying of a particle. In the furnace unit TBR-2.0 drying and ignition of the wet soft plant refuse particles with a radius less than 0.25 mm takes less than for 2 s, drying with the subsequent ignition of particles with a radius of 1-3 mm continues 30 s.

Keywords: Plant refuse; Burning; Drying; Duration of particle ignition.

For citation: Golubkovich A.V., Dadyko A.N. Approximate model of wet particle drying. *Sel'skokhozyaystvennye mashony i tekhnologii*. 2017; 4: 3-8. DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-3-8. (In Russian)

Сжигание растительных отходов (РО), в избытке остающихся на предприятиях пищевой, деревообрабатывающей промышленности и в сельскохозяйственном производстве, в топках теплотехнических устройств позволит существенно снизить затраты жидкого и газообразного топлива [1-4].

Для мелких частиц (радиус ≤0,3 мм) интенсивный выход летучих веществ начинается практически только в конце стадии прогрева частицы, когда ее температура уже близка к температуре потока дымовых газов. Это позволяет применить для таких частиц изотермическую модель расчета выхода летучих компонентов. Для частиц R= 0,3-1 мм этот расчет необходимо проводить по неизотермической модели, но можно не учитывать градиент температур по сечению частицы. Для частиц R>1 мм необходимо учитывать нестационарность процесса выхода летучих веществ во времени и по сечению частицы. При этом в расчетах прогрева необходимо учитывать переменность теплофизических характеристик (плотности, теплоемкости и др.) [5, 6].

При нестационарном воспламенении угольных частиц выделен ряд последовательных стадий: инертный прогрев до температуры начала испарения влаги; испарение влаги; выход летучих веществ; зажигание твердого кокса [7, 8]. Такие же стадии можно выделить при рассмотрении процесса воспламенения частиц РО.

При расчетах высокоскоростного прогрева топливных частиц и выхода из них летучих компонентов в условиях топочной камеры можно пренебречь влиянием экзо- и эндотермических реакций термической деструкции, так как их доля в суммарном теплоподводе меньше 10%, а в большинстве случаев не превышает 5%.

Цель исследования – теоретическое обоснование процессов тепломассопереноса при нагреве частицы твердого топлива и расчет длительности зажигания.

Материалы и методы. При решении задачи принимали следующие упрощающие допущения (не накладывающие существенных ограничений на общность постановки задачи):

– при термическом разложении РО учитывают наличие газообразного компонента;

– термохимическое взаимодействие РО и водяных паров не рассматривают;

– теплофизические характеристики РО не зависят от температуры;

– частица нагревается за счет конвекции;

– выделение смол при термической деструкции органической части РО не учитывают.

Влияние ряда факторов, отраженных в допущениях, ранее исследована при решении задач зажигания ряда топлив, например водоугольных [2]. Сделаны выводы о правомерности принятых допущений.

Приняли следующие условия сушки:

– теплота, выделяемая в результате реакции термического разложения, существенно ниже поступающей при сжигании топлива и не учитывается.

– на границе системы частицы «РО – среда» выполняется условие $dT/dR = 0$, где T – температура, R – радиус частицы, мм.

При сжигании процесс сушки топлива переносится в топочную камеру, так как пневмоподача топлива, а тем более другой вид подачи не позволяют существенно снизить влажность частиц топлива.

Сушка крупных частиц топлива с самого начала протекает в периоде падающей скорости сушки, сопровождается углублением фронта испарения внутрь материала, выделением и зажиганием летучих компонентов. Приближенная теория процесса высокотемпературной сушки и горения влажных топлив предполагает, что частица РО имеет форму шара радиусом R. В условиях конвективного и лучистого теплообмена с дымовыми газами, находящимися при высокой температуре $T_с$, частица прогревается до температуры кипения воды $T_и$. При этом начинается процесс интенсивного испарения влаги, фронт которого с координатой $r = \xi(\tau)$ с течением времени τ перемещается вглубь материала. Внутри частицы образуются «сухая» и «мокрая» зоны. Температуру «мокрой» зоны ($r<\xi$) будем считать постоянной и равной $T_и$. В «сухой» зоне ($\xi<r\leq R$) температурное поле неравномерно, и все точки этой зоны, включая поверхность частицы, продолжают нагреваться. Влагосодержание материала в «сухой» зоне примем равным нулю, а в «мокрой» – начальному W_0. В процессе углубления зоны испарения начинается прогрев, выделение летучих веществ и

их воспламенение в «сухой» зоне [9, 10].

Результаты и обсуждение. Для вывода уравнения зажигания рассмотрим температурное поле «сухой» зоны частицы. В предположении о том, что коэффициент теплоотдачи α одинаков по всей поверхности, это поле будет одномерным: $T = T(r, \tau)$.

Уравнение теплопроводности, описывающее одномерное стационарное температурное поле в телах сферической формы, может быть записано в виде:

$$\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial T}{\partial r}\right)=0. \quad (1)$$

На поверхности частицы ($r - R$) происходит конвективный теплообмен со средой, описываемый граничным условием третьего рода:

$$\lambda\frac{\partial T(R,\tau)}{\partial r}+\alpha T(R,\tau)=\alpha T_c(\tau), \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности «сухой» области материала.

На поверхности раздела зон ($r - \xi$) температура равна температуре кипения (граничное условие первого рода):

$$T(\xi, \tau) = T_и. \quad (3)$$

Решение задачи (1)-(3) имеет вид [4]:

$$T(r,\tau)=T_и+\frac{T_c-T_и}{1-\frac{\xi}{R}\left(1-\frac{1}{Bi}\right)}\left(1-\frac{\xi}{r}\right). \quad (4)$$

В правой части выражения (4) функции времени представлены температурой среды $T_c(\tau)$ и координатой границы раздела зон $\xi(\tau)$. При изменяющемся во времени коэффициенте теплоотдачи α переменным будет и значение критерия Био $Bi=\frac{\alpha R}{\lambda}$.

Для нахождения временной зависимости положения фронта интенсивного испарения $\xi(\tau)$ воспользуемся условием Стефана:

$$-\lambda\frac{\partial T(\xi,\tau)}{\partial L}=L\gamma_c W_0\frac{d\xi}{d\tau}, \quad (5)$$

где L – удельная теплота испарения воды; γ_c – плотность частицы.

Подставляя (4) в условие (5) и полагая $Bi = const$, проинтегрируем (5) с учетом начального условия $\xi(0) = R$. После преобразований получим уравнение:

$$\int_0^t\theta_c(\vartheta)d\vartheta=1+\frac{2}{Bi}-3\eta^2+2\left(1-\frac{1}{Bi}\right)\eta^3, \quad (6)$$

где введены следующие безразмерные величины:

- относительное время $t=\tau_з/\tau^*$ ($\tau_з$ – время сушки;
- время сушки частицы τ^* при $Bi \to \infty$);
- относительная избыточная температура среды $\theta_c=\frac{T_c-T_и}{T_{c0}-T_и}$;
- начальная температура среды T_{c0};
- относительная координата фронта интенсивного испарения $\eta = \xi/R$.

Установим связь между средним влагосодержанием частицы $\bar{W}$ и величиной η. Согласно принятой модели, вся масса влаги m сосредоточена в объеме «мокрой» зоны и равна:

$$m_в=W_0\gamma_c\frac{4}{3}\pi\xi^3,$$

где γ_c – удельная масса сухого вещества.

Определяем массу сухого вещества частицы:

$$m_c=\gamma_c\frac{4}{3}\pi R^3.$$

Тогда $\bar{W}=\frac{m_в}{m_c}=W_0\frac{\xi^3}{R^3}=W_0\eta^3$, а относительное влагосодержание:

$$y_к=\frac{\bar{W}}{W_0}=\eta^3.$$

С учетом найденного соотношения имеем $\eta = y_к^{1/3}$ и после подстановки в (6) получим уравнение кинетики сушки частицы:

$$\int_0^t\theta_c(\vartheta)d\vartheta=1+\frac{2}{Bi}-3y_к^{2/3}+2\left(1-\frac{1}{Bi}\right)y_к. \quad (7)$$

Если температура топочного газа T_c постоянна и равна T_{c0}, то $\theta_c \equiv 1$, и уравнение (7) принимает вид:

$$t=1+\frac{2}{Bi}-3y_к^{2/3}+2\left(1-\frac{1}{Bi}\right)y_к. \quad (8)$$

Безразмерное время $\tau_з$, необходимое для сушки частицы, найдем, положив в (8) величину $y_к = 0$:

$$t=1+\frac{2}{Bi}. \quad (9)$$

Из полученного выражения следует, что время $\tau_з$ зависит от значения критерия Bi. При очень интенсивном теплообмене поверхности частицы с газом ($Bi \to \infty$) это время минимально: $t = 1$, что соответствует времени τ^*.

Величину τ^* можно определить, если принять во внимание уравнения теплопроводности и испарения влаги из частицы за счет поступающего тепла. Первое выражение имеет вид:

$$Q=\frac{\lambda(T_c-T_и)}{R}F, \quad (10)$$

где Q – тепло, Вт;

F – поверхность частицы, м.

Второе выражение:

$$Q=\frac{m_c\Delta W L}{\tau}\eta, \quad (11)$$

где m_c – масса сухого вещества.

Отсюда время сушки частицы:

$$\tau^* = \frac{m_c\,\Delta U\,L\,R}{\lambda\left(T_c - T_н\right)F} = \frac{\Delta U\,L\,R}{\lambda\left(T_c - T_н\right)f\,\eta}. \qquad (12)$$

где ΔU – влагосъем, кг влаги/кг сухого вещества, $\Delta U = U_0 - U_к$ (U_0, $U_к$ – начальное и конечное влагосодержание);

f – удельная поверхность частицы $f = F/m$, м^2/кг,

Отметим, что время τ^* – это минимально возможное время сушки частицы.

Зажигание частицы может произойти и при продолжающейся подсушке, а коэффициент теплоотдачи α в реальных условиях имеет конечное значение. Тогда длительность сушки $\tau_з$, в соответствии с (8), будет равна:

$$\tau_з = \tau^*\left[1 + \frac{2}{Bi} - 3\,y_к^{2/3} + 2\left(1 - \frac{1}{Bi}\right)y_к\right], \qquad (13)$$

где τ^* определяется выражением (11); $y_к = \bar{W}_к / W_0$ ($\bar{W}_к$, W_0 – конечное и начальное влагосодержание, кг/кг).

При $T_c < T_{c0}$, что происходит в реальной топке, величина $\theta_c \neq 1$. Величину T'_c можно определить из баланса теплоты, приняв, что основные ее затраты приходятся на испарение влаги, тогда:

$$T'_c = T_{c0} - \frac{r\,B\,W_0\,f}{c_т\,V_0\,\alpha_т\left(1 + W_0\right)}\left(1 - y_к\right), \qquad (14)$$

где B – расход топлива, кг/ч;

V_0 – стехиометрический расход воздуха на горение, кг/ч;

$\alpha_т$ – избыток воздуха безразмерная величина;

$c_т$ – теплоемкость материала, кДж/(кг·°С).

Выражение (13) в этом случае для комплекса частиц примет вид:

$$\tau_з = \frac{T' - T_н}{T_{c0} - T_н}\,\tau^*\left[1 + \frac{2}{Bi} - 3\,y_к^{2/3} + 2\left(1 - \frac{1}{Bi}\right)y_к\right].$$

Моделирование сушки частицы в условиях топки. Для случая горения крупной частицы влажного топлива (R>10 мм) можно выделить условно три периода сушки:

τ_1 – сушка в период до воспламенения летучих веществ;

τ_2 – сушка в период видимого горения летучих компонентов до воспламенения кокса;

τ_3 – сушка, протекающая параллельно с выгоранием кокса.

Каждому из этих периодов будет соответствовать определенное положение зоны испарения, по которому можно рассчитать остаточное влагосодержание частицы $y_к$ и определить $\tau_з$ (13).

Приближенно суммарное время сушки для всех трех периодов будет равно $\tau_з = \tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3$, что и представляет собой длительность зажигания частицы.

Рассчитаем процессы сушки (зажигания) частиц с разной начальной влажностью и при различных α. Например, в топочном блоке ТБР-2,0 примем T_c = 900°С, а $T_и$ = 110°С. Расчеты показали, что у частиц радиусом R<1 мм при W<10% воспламенение летучих компонентов и горение коксового остатка начинается после подсушки. Если же R>1 мм при W>10%, то воспламенение летучих веществ начинается не раньше, чем заканчивается процесс сушки. При R>2 мм и W>10% процесс сушки завершается в период горения коксового остатка.

Согласно (12), продолжительность процесса τ^* обратно пропорциональна разности температур ($T_c - T_и$). Поэтому при прочих равных условиях увеличение температуры газа ведет к интенсификации процесса. Эту разность можно изменять лишь в достаточно узких пределах. Параметры, которыми также можно управлять, – это коэффициент теплоотдачи и размер частиц. Из уравнения (9) следует, что время сушки сокращается с увеличением критерия Bi, а значит, и коэффициента теплоотдачи; согласно (12), величина τ^* прямо пропорциональна R и обратно пропорциональна f. Повысить α можно в ходе увеличения относительной скорости потока газа, обтекающего частицу, создания тангенциальных потоков, завихрений, а также путем измельчения частиц РО.

Математическая модель позволяет количественно оценить роль обоих этих факторов на разных стадиях процесса зажигания. Влияние величин R и α на продолжительность процесса можно проанализировать с помощью уравнений (8) и (12). Результаты расчетов свидетельствуют о том, что время сушки существенно зависит от размеров частиц и, в меньшей степени, от коэффициента теплоотдачи. В первую очередь это относится к крупным частицам.

Таким образом, при ограниченных возможностях изменения коэффициента теплоотдачи сократить время сушки можно только двумя способами: использованием мелких частиц (гранул) или предварительной подсушкой их вне топки (*рис. 1-3*).

Тестовые задачи сушки. Приближенные решения (13) выполнены при менее сложных моделях тепломассопереноса.

Одномерный перенос на основе коэффициента теплоотдачи. Пренебрегая теплопроводностью для частиц R >1 мм, уравнение теплового баланса при сушке можно записать в следующем виде [13]:

$$\alpha\,S\left(T_c - \theta\right)\eta = \frac{dU}{d\tau}\,M\,L, \qquad (15)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м^2·°С;

S, M – поверхность и масса частиц, м^2 и кг;

η – доля теплоты, пошедшей на испарение влаги;

T_c, θ – температура среды и материала, °С;

U – влагосодержание частиц РО, кг/кг;

τ – длительность сушки, ч.

Из уравнения (15) следует:

$$\tau = \frac{\Delta U\, L}{f\, \alpha \left(T - \theta_{ср}\right) \eta}, \qquad (16)$$

где $\theta_{ср}$ – средняя температура частиц, °С.

Так как температура частиц возрастает в процессе сушки, то вместо θ примем $\theta_{ср}$. Если температура среды не остается постоянной, то также необходимо выбрать среднюю величину. Как установлено, подсушка протекает параллельно с выделением летучих компонентов и горением коксового остатка, поэтому целесообразно конечное влагосодержание частиц принять равным $W_к \simeq 0$ и выражение (16) переписать в виде:

$$\tau = \frac{A\, U_0}{f\, \alpha \left(T_{ср} - \theta_{ср}\right) \eta}, \qquad (17)$$

где A – численный коэффициент, учитывающий комплекс допущений, принятых при расчете, определяется в ходе эксперимента.

Одномерный перенос на основе коэффициента теплопроводности. При малых размерах R<0,25 мм частица практически сразу принимает скорость топочных газов, и конвективный теплообмен существенно ниже теплопроводности. Следовательно, длительность сушки вычисляют по формуле (12).

Так как при расчете τ было принято допущение по низкой эффективности теплообмена, то коэффициент теплопроводности играет существенную роль и подлежит уточнению в ходе эксперимента.

Для сопоставления результатов исследования по длительности сушки в топке и изотермической модели запишем их отношение. Допуская, что форма частицы неизменна, а коэффициент α не зависит от ($T_{ср} - \theta_{ср}$), запишем эту величину в виде:

$$\kappa = \frac{\eta_т \left(T_{ср} - \theta_{ср}\right)_т}{\left(T_{ср} - \theta_{ср}\right)_м \eta_м}, \qquad (18)$$

где индексами «т» и «м» обозначены величины, относящиеся, соответственно, к топке и модели.

Величина η может быть записана как:

$$\eta = \frac{\Delta U\, L}{\Delta\theta\, c_т + \Delta U L}, \qquad (21)$$

где ΔU – съем влаги при сушке, кг/кг;

$\Delta\theta$ – перепад температур в частице, °С;

$c_т$ – теплоемкость частицы, кДж/кг·°С.

Рассматривая сушку РО (лузга подсолнечника) при ΔU = 0,1 кг/кг; $(T_{ср} - \theta_{ср})_т$ = 785°С; $(T_{ср} - \theta_{ср})_м$ = 30°С; $\Delta\theta = \theta_к - \theta_м$ ($\theta_к$ =100°С; $\theta_м$ = 20°С); $c_т$ = 1,47 кДж/(кг·°С); L = 2,5 МДж/кг, получим: $\eta_т$ = 0,68; $\eta_м$ = 0,84 и κ = 21,2.

Следовательно, при моделировании сушки в изотермической модели время сушки должно быть снижено в 21,2 раза, чтобы соответствовать реальной продолжительности сушки.

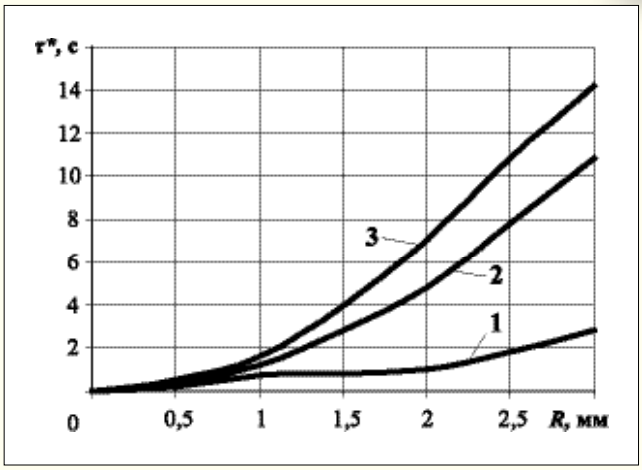


Рис. 1. Зависимость τ от R при 1 – W_0 = 10%, 2 – W_0 =15%, 3 – W_0 =20%; λ = 0,83 кДж/кг·°С; (W_k/W_0)= 0; T_c = 900°С*

Fig. 3. Depending τ on R when 1 – W_0 = 10%, 2 – W_0 =15%, 3 – W_0 =20%; λ = 0,83 kJ/kg·°C; (W_k/W_0)= 0; T_c = 900°C*

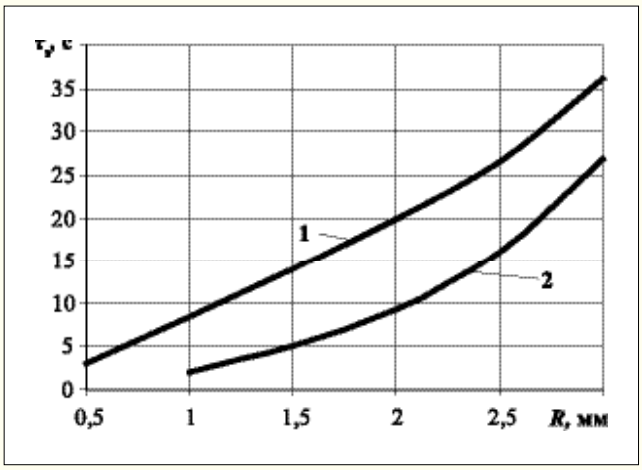


Рис. 2. Зависимость $\tau_з$ от R при α = 40 Вт/(м²·°С); T_c = 900°С: 1 – (W_k/W_0) = 0; 2 – (W_k/W_0) = 0,5

Fig. 4. Depending $\tau_з$ on R when α = 40 W/(m²·°C); T_c = 900°C: 1 – (W_k/W_0) = 0; 2 – (W_k/W_0) = 0,5

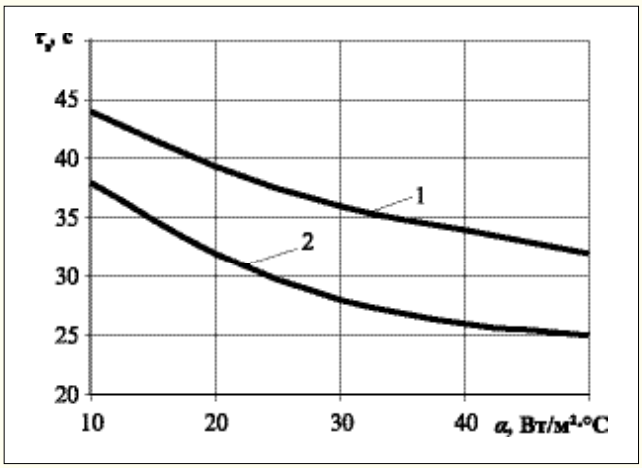


Рис. 3. Зависимость $\tau_з$ от α при R = 1,5 мм; T_c = 900°С: 1 – (W_k/W_0) = 0; 2 – (W_k/W_0) = 0,5

Fig. 5. Depending $\tau_з$ on α when R = 1,5 mm; T_c = 900°C: 1 – (W_k/W_0) = 0; 2 – (W_k/W_0) = 0,5

Выводы. В крупной влажной частице растительных отходов (R >1 мм) при поступлении в топочную камеру одновременно происходят процессы сушки, выделения и воспламенения летучих компонентов и горение коксового остатка.

На процесс сушки существенное влияние оказывает размер частицы, эта зависимость близка к квадратичной. С повышением коэффициента теплоотдачи сокращается время сушки: чем меньше размер частиц, тем быстрее проходит сушка.

Сформулирована и решена нестационарная задача сушки частицы РО в условиях топочного блока ТБР-2,0 в рамках модели, учитывающей совместное протекание основных процессов термической подготовки: нагрев частиц, испарение влаги, конвективный теплоперенос.

Теоретически и экспериментально исследованы основные закономерности теплопереноса при зажигании частиц РО. Проведен анализ влияния на условия и характеристики зажигания таких параметров, как температура внешней среды, размеры частицы, условия теплообмена с внешней средой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. Система технологий и машин для инновационного развития АПК России // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России: Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции Ч. 1. М.: ВИМ, 2013. С. 9-12.

2. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. Сизов О.А., Перспективное пути применения энерго- и экологически эффективных машинных технологий и технических средств // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. № 4. С. 8-11.

3. Сыродой С.В. Термическая подготовка и зажигание частиц водоугольного топлива применительно к топкам котельных агрегатов: Автореф. дисс. … канд. техн. наук. Томск, 2014. 130 с.

4. Беляев А.А. Сжигание высокозольных топлив в топках с кипящим слоем промышленных котлов. М.: МЭИ, 2004. 69 с.

5. Петров-Денисов В.Г. К теории углубления фронта фазового превращения и образования избыточного давления во влажных материалах в процессе сушки // Химическая промышленность. 1979. N6. С. 348-351.

6. Sadjad Abasi, Saied Minaei. Effect of drying temperature of mechanical properties of dried corn. Drying technology. 2017. Vol. 32; 7: 774-780. (In English)

7. Вильямс Ф.А. Теория горения. М.: Наука, 1971. 615 с.

8. Кумагаи С. Горение. М.: Химия, 1979. 255 с.

9. Dagaut P., Cathonnet M. The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: A review of experimental and kinetic modeling. Progress in energy and combustion science. 2006; 32: 48-92.

10. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М.: Химия, 1984. 320 с.

REFERENCES

1. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P. System of technologies and machinery for innovative development of agrarian and industrial complex of Russia. Sistema tekhnologiy i mashin dlya innovatsionnogo razvitiya APK Rossii: Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Vol. 1. Moscow: VIM, 2013: 9-12. (In Russian)

2. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Sizov O.A. Long-term ways of use of energy and environmentally efficient machine technologies and techniques. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2013; 4: 8-11. (In Russian)

3. Syrodoy S.V. Termicheskaya podgotovka i zazhiganie chastits vodougol'nogo topliva primenitel'no k topkam kotel'nykh agregatov [Thermal preparation and ignition of particles of water-coal fuel in relation to fire chambers of boiler units]: Avtoref. diss. … kand. tekhn. nauk. Tomsk, 2014: 130. (In Russian)

4. Belyaev A.A. Szhiganie vysokozol'nykh topliv v topkakh s kipyashchim sloem promyshlennykh kotlov [Combustion of high-ash fuels in fire chambers with fluidized bed of industrial boilers]. Moscow: MEI, 2004: 69. (In Russian)

5. Petrov-Denisov V.G. To theory of deepening of front of phase transformation and formation of plus pressure in wet materials in course of drying. *Khimicheskaya promyshlennost'*. 1979; 6: 348-351. (In Russian)

6. Sadjad Abasi, Saied Minaei. Effect of drying temperature of mechanical properties of dried corn. *Drying technology*. 2017. Vol. 32; 7: 774-780. (In English)

7. Vil'yams F.A. Teoriya goreniya [Theory of burning]. Moscow: Nauka, 1971: 615. (In Russian)

8. Kumagai S. Gorenie [Burning]. Moscow: Khimiya, 1979: 255. (In Russian)

9. Dagaut P., Cathonnet M. The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: A review of experimental and kinetic modeling. Progress in energy and combustion science. 2006; 32: 48-92. (In English)

10. Sazhin B.S. Osnovy tekhniki sushki [Bases of drying technology]. Moscow: Khimiya, 1984: 320. (In Russian).

Критерии авторства. Все авторы несут ответственность за представленные в статье сведения и плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution. The authors are responsible for information and plagiarism avoiding.

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

УДК 681.243 DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-9-13

ОСОБЕННОСТИ СУШКИ ЗЕРНА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТОПОЧНЫХ БЛОКОВ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Павлов С.А.[1]*,
канд. техн. наук;

Дадыко А.Н.[2],
инженер

[1]Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 1-й Институтский проезд, 5, Москва, 109428, Российская Федерация, *e-mail: vim@vim.ru
[2]ООО «ОКБ по теплогенераторам», ул. 2-я Мичурина, 2а, стр. 4, г. Брянск, 241021, Российская Федерация

Использование альтернативных видов топлив для сушки зерна и разработка технических средств сушки, в том числе топочных устройств на растительных отходах, являются в настоящее время актуальной задачей. Отметили, что режим сушки с повышающейся температурой агента сушки считается оптимальным для семенного зерна повышенной влажности, поэтому в период прогрева топки и зерна использовано бесступенчатое повышение температуры агента сушки от начальной до конечной. Показали, что в начале топку разжигают с помощью жидкостной или газовой горелки, затем подают твердое топливо. В топочном блоке при подаче твердого топлива первичного и вторичного дутья возникают циклонно-вихревые контуры, в которых циркулируют твердые частицы. Определили, что при использовании в качестве топлива растительных отходов частицы подсушиваются и воспламеняются, начинается прогрев топки и агента сушки, который поступает в подогреватель и в сушилку. Агент сушки одновременно прогревает топку и высушивает зерно, которое циркулируют в сушилке. По достижении кондиционной влажности сушилку переводят на поток. Предложили для расчета длительности сушки использовать математические модели нагрева и охлаждения топки на основе теплового баланса и изменения энтальпии топочной камеры. При этом первую партию зерна высушивают при восходящем температурном режиме одновременно с прогревом топки. Совмещение прогрева топки с сушкой зерна позволяет на 15-20 процентов снизить затраты топлива, так как прогрев топочного блока занимает 1-1,5 часа. При сушке последней партии зерна осуществляется нисходящий режим, то есть одновременно с охлаждением топки происходит сушка зерна с понижающей температурой. Предложили длительность сушки рассчитывать по классическим выражениям, при этом температуру агента сушки принимать средней с учетом разогрева топки и теплообменника, последнюю партию зерна высушивать при нисходящем температурном режиме. Длительность процесса определяется температурой высушенного материала и режимом охлаждения топки. Установили, что при расчете расхода твердого топлива учитывают затраты тепла не только на сушку зерна, но и на прогрев топки, что является функцией теплотехнических параметров топки и сушилки.

Ключевые слова: зерно, сушка, топка, растительные отходы.

Для цитирования: Павлов С.А., Дадыко А.Н. Особенности сушки зерна при использовании топочных блоков на твердом топливе // *Сельскохозяйственные машины и технологии.* 2017. N4. С. 9-13

FEATURES OF GRAIN DRYING USING SOLID FUEL FURNACE BLOCKS

Pavlov S.A. [1]*,
Ph. D. (Eng.);

Dadyko A.N.[2]

[1]Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, 109428, Russian Federation, *e-mail: vim@vim.ru
[2]OOO «Heat generators experimental design bureau», 2nd Michurin St., 2a build. 4, Bryansk, 241021, Russian Federation

The urgent tasks in agriculture are fuels alternative types use for grain drying and development of drying technical means, including furnace devices on plant refuse. The drying mode with the increasing temperature of the drying agent is considered as optimum for wet seed grain. Therefore, grain continuously variable temperature increase of the drying agent from initial to finite is used during warming up of a fire chamber. At the beginning the fire chamber is kindled by means of a liquid or gas torch, then solid fuel is given. In the furnace unit in case of submission of solid fuel of primary and secondary blasting there are cyclonic and vortex circuits in which solid particles circulate. When using of plant refuse as fuel the particles are dried and

ignite, warming up of a fire chamber and the agent of drying which comes to a heater and to the dryer begins. The drying agent at the same time warms up a fire chamber and dries up grain which circulate in the dryer at the same time. On reaching standard humidity the dryer is transferred to a flow. The authors suggested to use for calculation of drying duration mathematical models of heating and cooling of a fire chamber on the basis of a heat balance and change of an enthalpy of the furnace camera. At the same time the first batch of grain is dried up in case of the ascending temperature condition along with warming up of a fire chamber. Combination of warming up of a fire chamber with grain drying o allows to lower fuel expenses by 15-20 percent as warming up of the furnace unit takes 1-1,5 hours. When drying the last batch of grain the descending mode is carried out. Along with cooling of a fire chamber there is a drying of grain at step-down temperature. Drying duration should be calculated on classical formulas. At the same time temperature of the agent of drying is accepted as average taking into account heat-up the fire chamber and the heat exchanger. The last batch of grain should be dryed up in case of the descending temperature condition. Process duration is defined by temperature of the dried-up material and the mode of cooling of a fire chamber. When calculating the expenditure of solid fuel we should consider costs of heat not only of grain drying, but also of warming up of a fire chamber that is function of thermotechnical parameters of a fire chamber and the dryer.

Keywords: Grain; Drying; Fire chamber; Plant refuse.

For citation: Pavlov S.A. , Dadyko A.N. Features of grain drying using solid fuel furnace blocks. Sel'skokhozyaysrvennye mashiny i tekhnologii. 2017; 4: 9-13. DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-9-13. (In Russian).

Использование альтернативных видов топлив для сушки зерна и разработка технических средств сушки, в том числе топочных устройств на растительных отходах, являются в настоящее время актуальной задачей. Растительные отходы в большом количестве остаются при послеуборочной обработке зерновых и крупяных культур, представляющих собой ценное биотопливо, а технические средства сжигания находят применение в сельском хозяйстве [1-6].

Известна технология сушки первой партии зерна перед запуском зерносушилки на поток, заключающаяся в том, что разжигают топку, прогревают зерно, циклически высушивают его до кондиционной влажности при пониженной температуре в течение 15-20 мин, затем сушилку переводят на поток. Температуру агента сушки регулируют изменением подачи топлива и воздуха. Недостаток этой технологии заключается в повышенных затратах тепла на розжиг и необходимость прогрева топки при переходе на твердое топливо.

Цель исследований – расчет длительности высушивания первой и последней партий зерна, а также расхода твердого топлива.

Материалы и методы. Режим сушки с повышающейся температурой (восходящий температурный режим) наиболее оптимален для семенного зерна повышенной влажности. Поэтому в период прогрева топки одновременно прогревают зерно, используя бесступенчатое повышение температуры агента сушки от начальной до конечной допустимой температуры t_k. При этом температура зерна по мере снижения влажности повышается до предельно допустимой [7].

При разогреве топки 30-35% тепла от сгорания топлива поступает на прогрев обмуровки топочного блока [8].

Для расчета расхода твердого топлива при сушке первой партии составили тепловой баланс затрат топлива на сушку и поступление тепла при сжигании твердого топлива. Были получены аналитические выражения для расчета длительности сушки и расхода топлива.

Затраты тепла на сушку зерна можно записать следующим образом:

$$Q = \frac{G_з \Delta U q}{\eta}, \quad (1)$$

где $G_з$ – вместимость сушилки по зерну, кг;

ΔU – влагосъем, кг вл./кг сух мат.;

q – удельные затраты теплоты на испарение влаги из зерна, кДж/кг;

η – доля теплоты, пошедшая на испарение влаги.

Количество теплоты, выделенное при сжигании твердого топлива, составляет:

$$Q_з = B Q_н^р \tau \eta_0 (1 - \eta^\circ), \quad (2)$$

где B – расход твердого топлива, кг/ч;

$Q_н^р$ – низшая теплота сгорания твердого топлива, кДж/кг;

τ – длительность сушки, ч;

η_0 – КПД топки;

η° – доля теплоты, пошедшая на прогрев топки, $\eta^\circ \approx 0{,}35$.

Приравнивая правые части выражений (1) и (2), получим:

$$B = \frac{G_з \Delta U q}{Q_н^р \eta_0 \tau \eta (1 - \eta^\circ)}, \quad (3)$$

или

$$\tau = \frac{G_з \Delta U q}{B Q_н^р \eta_0 \eta (1 - \eta^\circ)}. \quad (4)$$

Рассмотрим сушку первой партии зерна на примере колонковой сушилки типа СЗТ.

На *рисунке 1* приведена схема топочного блока. Первую партию зерна высушивают следующим образом (*рис. 1*).

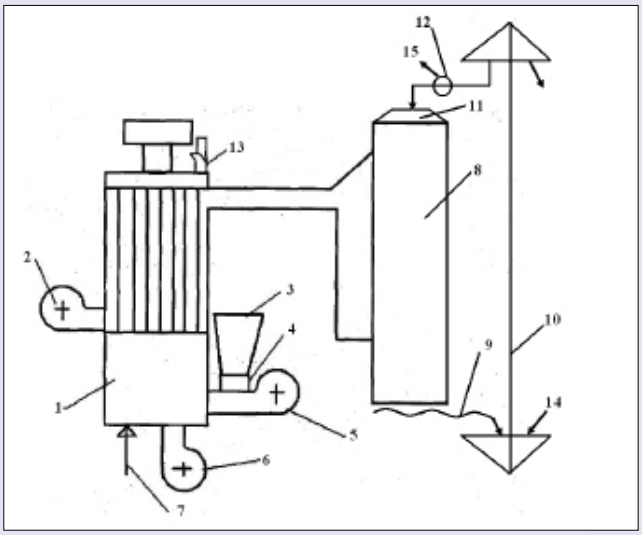


Рис. 1. Технологическая схема топочного блока в агрегате с сушилкой

Fig. 1. Process scheme of the furnace block in the unit with the dryer

Норией *10* влажное зерно *13* загружают в сушилку *8*. Затем с помощью жидкостной горелки *7* разжигают топку, дозатором *4* подают из бункера *3* твердое топливо вместе с первичным дутьем *5*. Дымовые газы, образующиеся при сжигании твердого топлива, поступают в воздухоподогреватель и дымососом *13* выбрасываются наружу. Вентилятор *2* засасывает наружный воздух в воздухоподогреватель *1*, а затем в качестве агента сушки направляет его в сушилку *8*. Зерно в сушилке высушивают циркуляционно через средство разгрузки *9*, норию *10* и клапан *12*, поставленный в положение «циркуляция». Как только влажность зерна достигает кондиционной, в сушилку подают новую порцию влажного зерна *14*, а сухое зерно *15* выводят, перебросив клапан *12* на в положение «поток».

В топочном блоке при подаче твердого топлива, первичного и вторичного дутья возникают циклонно-вихревые контуры, в них циркулируют твердые частицы. При использовании в качестве топлива растительных отходов частицы подсушиваются и воспламеняются, начинается прогрев топки и агента сушки, который направляется в сушилку [9].

Контроль за сушкой и горением топлива осуществляют по температуре агента сушки в диффузоре сушилки, которая должна составлять в колонковых и шахтных сушилках не более $t = Q_{пд}+(15...20)$, где $Q_{пд}$ – предельно допустимая температура нагрева зерна, °С.

Результаты и обсуждение. Для расчета длительности сушки первой партии зерна при постоянной температуре агента сушки можно использовать выражение [10, 11]:

$$\tau = \frac{\Delta U\, qk}{\alpha f\left(t_{ср} - \theta_{ср}\right)\eta}, \qquad (5)$$

где k – коэффициент, $k = H/h_i$ (H_i и h_i – толщина слоя зерна в сушилке и толщина элементарного слоя зерна, м.); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/м^2·°С; f – удельная поверхность материала, м^2/кг; $t_{ср}$ – средняя температура агента сушки, $t_{ср} = (t_н - t_к)/2$, где $t_н$ и $t_к$ – начальная и конечная его температура, °С; $Q_{ср}$ – средняя температура зерна, $Q_{ср} = (Q_н + Q_к)/2$,°С.

$Q_н$, $Q_к$ – начальная и конечная температура зерна, °С.

Примем $W_н$ = 22%, $W_к$ =14% ($W_н$, $W_к$ – начальная и конечная влажность зерна), α =23 Вт/м^2·°С; f =1,1 м^2/кг. Температуру агента сушки в начале прогрева примем $t_н$ = 25°С, в конце – $t_к$ = 60°С, температуру зерна в начале прогрева примем $Q_н$ = 25°С, в конце– $Q_к$ = 35°С и среднюю – $Q_{ср}$ = 30°С; также примем q =4,6 кДж/кг; $\eta = \Delta Uq/(\Delta Uq + \Delta\theta c)$ = 0,8 (c – теплоемкость зерна, равная 1,89 кДж/кг·°С); $\eta°$ = 0,35; q = 2500 кДж/кг, H = 0,2; h = 0,01м. После расчетов по (5) получим τ_0 = 0,9 ч.

Совмещение прогрева топки с сушкой зерна позволит на 15-20% снизить затраты топлива, так как прогрев топочного блока занимает 1-1,5 ч.

При сушке последней партии зерна осуществляется нисходящий режим, то есть одновременно с охлаждением топки происходит сушка зерна с понижающей температурой.

Последняя партия зерна высушивается из допущений: потери тепла в окружающую среду отсутствуют, и температура обмуровки одинакова по длине и толщине.

Длительность сушки последней партии зерна можно рассчитать из баланса теплоты и изменения энтальпии при охлаждении топочной камеры по формуле [7]:

$$\alpha = (T - T_0)\, F\, d\tau = G\, c_{об}\, dT, \qquad (6)$$

где T, T_0 – текущая температура топки и температура воздуха, °С;

G, F – масса обмуровки топки (кг) и ее поверхность (м^2);

$c_{об}$ – теплоемкость обмуровки, кДж/кг·°С.

Из (6) получим длительность сушки последней партии зерна:

$$\tau_1 = \frac{G\,c}{\alpha F} \ln \frac{T_н - T_0}{T_к - T_0}, \qquad (7)$$

где T_H, T_K – начальная и конечная температура топки °С на моменты прекращения подачи топлива и окончания сушки, °С.

Выражение (7) можно переписать в виде:

$$\tau_1 = \frac{в^*\, \rho\, c_{об}}{\alpha} \ln \frac{T_н - T_0}{T_к - T_0}, \qquad (8)$$

где $в^*$ – глубина охлаждения обмуровки топки, ρ – плотность обмуровки топки, кг/м^3.

Температуру T_K можно принять равной темпе-

ратуре высушенного зерна. Если дополнительно охлаждать зерно в сушилке, то конечная температура T_K будет на 6-8°С выше температуры T_0. Величину $в^*$ можно определить совместным решением уравнения (8) с уравнением прогрева шамотной стенки:

$$в^* = \sqrt{\frac{\tau_1 a}{0{,}35}},$$

где α – коэффициент температуропроводности шамотной стенки, $\alpha \simeq 0{,}002$ м^2/ч [9].

Длительность сушки последней партии зерна зависит от T_H, T_K и соответствует длительности охлаждения топки. Зависимость τ_1 от T_H и T_K при T_0=20°С представлена на *рисунке 2*.

Выводы. Первую партию зерна высушивают при восходящем температурном режиме одновременно с прогревом топки, длительность сушки рассчитывают по классическим выражениям, но температуру агента сушки принимают средней с учетом разогрева топки и теплообменника.

В расходе твердого топлива следует учитывать затраты тепла не только на сушку зерна, но и на прогрев топки, поскольку он является функцией теплотехнических параметров топки и сушилки.

Последнюю партию зерна высушивают при нисходящем температурном режиме, ее длительность определяется охлаждением топки до температуры высушенного материала и режимом охлаждения топки.

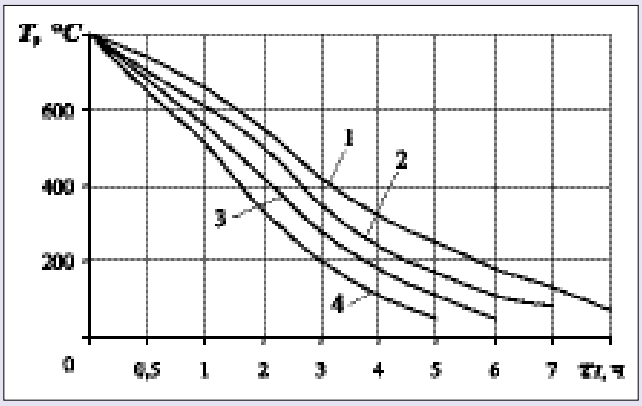


Рис. 2. К расчету длительности сушки последней партии зерна:
1 – охлаждение топки без зерна и продувки;
2, 3, 4 – охлаждение топки с продувкой, соответственно, при α = 10, 20 и 40 Вт/м^2 ·°С
Fig. 2. Duration of drying of the last batch of grain:
1 – cooling of a fire chamber without grain and a blowdown;
2, 3, 4 – cooling of a fire chamber with a blowdown, respectively, at α = 10, 20 and 40 W/sq.m · °C

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. Система технологий и машин для инновационного развития АПК России // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России: Сборник докладов Международной научно-технической конференции. Ч. 1. М.: ВИМ, 2013. С. 9-12.

2. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов О.А. Перспективные пути применения энерго- и экологически эффективных машинных технологий и технических средств // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. N4. С. 8-11.

3. Анискин В.И., Голубкович А.В. Перспективы использования растительных отходов в качестве биотоплив // Теплоэнергетика. 2004. N5. С. 60-65.

4. Анискин В.И., Голубкович А.В., Сотников В.И. Сжигание растительных отходов в псевдоожиженном слое // Теплоэнергетика. 2004. N6. С. 60-63.

5. Анискин В.И., Голубкович А.В. Топочные устройства на растительных отходах // Техника в сельском хозяйстве. 1999. N2. 27 с.

6. Витоженц Э.Н., Окунь Г.С., Чижиков А.Г., Добычин Н.А. Рекомендации по использованию материально-технической базы для сушки семян зерновых и других культур в семеноводческих хозяйствах. М.: Колос, 1983. С. 16-17.

7. Тинькова С.М., Прошкин А.В., Сторожев Ю.И. Задачи по теплотехнике. Красноярск: ГАЦМиЗ, 1996. С. 14.

8. Голубкович А.В. Топки на растительных отходах: процессы, конструкции, режимы, расчеты. М.: ВИМ, 2011. 172 с.

9. Сажин Б.С. Основы техники сушки. М.: Химия, 1984. 79 с.

10. Мамыкин П.С., Стрелов К.К. Топки, печи и сушилки огнеупорных заводов. М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1950. С. 140.

11. Дадыко А.Н. Моделирование аэродинамики факельно-вихревого режима в топке для растительных отходов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2016. N2. С. 32-35.

REFERENCES

1. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P. System of technologies and machinery for innovative development of agrarian and industrial complex of Russia. Sistema tekhnologiy i mashin dlya innovatsionnogo razvitiya APK Ros-sii: Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Vol. 1. Moscow: VIM, 2013: 9-12. (In Russian)

2. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Sizov O.A. Long-term ways of use of energy and environmentally efficient

machine technologies and techniques. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2013; 4: 8-11. (In Russian)

3. Aniskin V.I., Golubkovich A.V. Prospects of use of plant refuse as biofuels. *Teploenergetika*. 2004; 5: 60-65. (In Russian)

4. Aniskin V.I., Golubkovich A.V., Sotnikov V.I. Burning of plant refuse in a fluidized bed. *Teploenergetika*. 2004; 6: 60-63. (In Russian)

5. Aniskin V.I., Golubkovich A.V. Furnace systems on plant refuse. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve.* 1999; 2: 27. (In Russian)

6. Vitozhents E.N., Okun' G.S., Chizhikov A.G., Dobychin N.A. Rekomendatsii po ispol'zovaniyu material'no-tekhnicheskoy bazy dlya sushki semyan zernovykh i drugikh kul'tur v semenovodcheskikh khozyaystvakh [Recommendations about use of material and technical resources for drying of seeds of grain and other crops in seed-growing farms]. Moscow: Kolos, 1983: 16-17. (In Russian)

7. Tin'kova S.M., Proshkin A.V., Storozhev Yu.I. Zadachi po teplotekhnike [Heat-process engineering tasks]. Krasnoyarsk: GATsMiZ, 1996: 14. (In Russian)

8. Golubkovich A.V. Topki na rastitel'nykh otkhodakh: protsessy, konstruktsii, rezhimy, raschety [Fire chambers on plant refuse: processes, designs, modes, calculations]. Moscow: VIM, 2011: 172. (In Russian)

9. Sazhin B.S. Osnovy tekhniki sushki [Bases of drying technology]. Moscow: Khimiya, 1984: 79. (In Russian)

10. Mamykin P.S., Strelov K.K. Topki, pechi i sushilki ogneupornykh zavodov [Fire chambers, furnaces and dryers in fire-resistant plants]. Moscow: Gos. nauch.-tekhn. izd-vo lit. po chernoy i tsvetnoy metallurgii, 1950: 140. (In Russian)

11. Dadyko A.N. Modeling of aerodynamics of flare and vortex mode in a fire chamber for vegetable waste. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2016; 2: 32-35. (In Russian)

Критерии авторства. Все авторы несут ответственность за представленные в статье сведения и плагиат.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution. The authors are responsible for information and plagiarism avoiding.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)
объявляет набор

на бюджетные и платные места

высшее образование – программа подготовки научно-педагогических кадров

в аспирантуру

на 2017-2018 учебный год

Лицензия №2498 от 15.02.2016

Государственная аккредитация № 2475 от 19 января 2017 года

По направлению подготовки 35.06.04

Технология, средства механизации и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве.

Профиль: Машины, агрегаты и процессы (по отраслям);
Профиль: Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве;
Профиль: Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве.
Профиль: технологии и средства механизации сельского хозяйства.

высшее образование – программа Магистратуры на платные места

Лицензия №2498 от 15.02.2016

Адрес института: 109428, Москва, 1-й Институтский проезд, 5. Телефон для справок: 8 (499) 709-33-68.

УДК 66.087 DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-14-19

ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ОДНОПРОВОДНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Юферев Л.Ю.,
докт. техн. наук

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 1-й Институтский проезд, дом 5, Российская Федерация, Москва, 109428, Российская Федерация, e-mail: leouf@yandex.ru

Повышение эффективности линий электропередачи – важное условие обеспечения сельскохозяйственных объектов электрической энергией. За время развития систем передачи электрической энергии появились линии постоянного тока, линии переменного напряжения промышленной частоты и линии переменного напряжения повышенной частоты. Автор рассматривает особенности работы систем передачи электрической энергии, разработанных Всероссийским институтом электрификации сельского хозяйства, по однопроводным линиям электропередачи, работающим на повышенной частоте в диапазоне 5-20 кГц. Показано, что система позволяет передавать электрическую энергию по одному проводу с возвратом через плохо проводящие грунты на повышенной частоте. При этом отметили, что для работы однопроводной системы электропередачи требуется организовывать заземление. Установили, что отличительной особенностью работы заземления на повышенной частоте является то, что, кроме проводимости грунта, работает также диэлектрическая проницаемость его слоев. Это позволяет уменьшить размеры заземлителей или передавать электрическую энергию через плохо проводящие грунты с небольшими потерями. Приведены расчеты эффективности передачи электрической энергии. Определили, что эффективность передачи электрической энергии мощностью 10 кВт на частоте 10 кГц через сухой кремнезем может составлять 96,5 процента, в то время как на частоте 50 Гц эффективность передачи будет стремиться к нулю. Провели оценку коррозионных повреждений стальных электродов, размещенных в электролите на токах различной частоты. Приведены результаты эксперимента по влиянию повышенной частоты на цепи заземлителей. Установили, что на повышенной частоте 2,6 и 100 кГц коррозия электродов уменьшается по сравнению с частотой 50 Гц на 15-20 процентов, а по сравнению с постоянным током – в 60 раз. Это позволяет использовать в качестве заземлителей однопроводной линии электропередачи не только специальные электроды, но и сельскохозяйственные объекты.

Ключевые слова: передача электрической энергии, сети повышенной частоты, однопроводная линия, заземление.

Для цитирования: Юферев Л.Ю. Особенности работы однопроводных электросетей повышенной частоты // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N4. С. 14-19.

OPERATION PECULIARITIES OF SINGLE-WIRE HIGH FREQUENCY POWER TRANSMISSION LINES

Yuferev L.Yu.,
Dr. Sc. (Eng.)

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, 109428, Russian Federation, e-mail: leouf@yandex.ru

Increasing efficiency of power transmission lines is an important factor for providing agricultural objects with electric power. During the development power transmission systems, lines direct current, lines alternating voltage of industrial frequency and lines of alternating voltage high frequency have appeared. The author considers some features of operation power transmission systems over single-wire transmission lines operating at high frequency in range of 5-20 kHz. The system allows to transmit electrical energy on one wire with return through low-conductivity grounds due to the high frequency. To operate a single-wire power transmission system, it is necessary to arrange grounding. A distinctive feature work of grounding at a high frequency is that in addition to conductivity of soil, dielectric permittivity of soil layers also works. This makes it possible to reduce size of switches earthing or to transmit electrical energy through low-conductivity grounds with small losses. Calculations of efficiency of electric energy transfer are given. Efficiency of transmission electric power of 10 kW at a frequency 10 kHz through dry silica can be 96.5 percent. When the frequency is 50 Hz, so efficiency of transmission electric power will tend toward zero. Corrosion damages of the steel electrodes placed in an electrolyte on currents of various frequency were estimated. Effect of high frequency on circuit of grounding switches was studied. If the

high frequency equals 2.6 and 100 kHz, so the corrosion of electrodes decreases by 15-20 percent compared to the frequency of 50 Hz, and by 60 times in comparison with a constant current. Therefore as grounding conductors of a single-wire power line it is possible to use not only special electrodes, but also agricultural objects.

Keywords: Transmission of electrical energy; High-frequency networks (HF); Single-wire line; Grounding.

For citation: Yuferev L.Yu. Operation peculiarities of single-wire high frequency power transmission lines. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2017; 4: 14-19. DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-14-19. (In Russian)

За время эксплуатации силовых линий электропередач определились три ведущие типа сетей электроснабжения:

– сети переменного напряжения низкой частоты (НЧ, *LFAC*), 15-60 Гц, наибольшее распространение – 50/60 Гц;

– сети постоянного тока (*DC*, линии постоянного тока, ЛПТ);

– сети повышенной частоты (СПЧ, *HFAC*), 0,4-20 кГц, наибольшее распространение – 0,4/2,4 Гц.

Последние годы своей жизни М.О. Доливо-Добровольский, один из основоположников сетей НЧ переменного тока, был занят мыслью о передаче энергии на большие расстояния, применяя постоянный ток высокого напряжения. Свои взгляды по этому вопросу он изложил в обстоятельном докладе «О пределах возможности передачи энергии на расстояние переменным током», вызвавшем чрезвычайно оживленный, отчасти даже обостренный обмен мнениями.

В 1919 г. М.О. Доливо-Добровольский указывал, что при передаче энергии на большие расстояния, исчисляющиеся сотнями и тысячами километров, влияние емкости и самоиндукции линии электропередачи ограничит применимость переменных токов для этой цели. Доказывая преимущества подземных кабельных сетей перед воздушными для дальних электропередач, он указывал, что для этого случая еще более узки границы применимости переменного тока [1]. Современные исследования подтвердили преимущества линий постоянного тока *DC*:

– отсутствуют потери на излучение, так как электромагнитные волны излучает только проводник с переменным током;

– в сети нет реактивной (паразитной) мощности и, следовательно, исключены затраты на борьбу с ней, то есть нет коэффициента мощности и необходимости его улучшения;

– обеспечивается экономия на материалах опор и проводов для длинных ЛЭП.

Приведенная выше историческая справка кратко характеризует положение дел в течение последнего века – монопольное положение в большинстве областей остается за сетями *AC* 50/60 Гц. Однако в последнее десятилетия, согласно предсказанию М.О. Доливо-Добровольского, наблюдается переход к *DC* в областях длинных подводных, подземных ЛЭП [2]. Также *DC*-сети успешно применяются в специальных целях – локальные промышленные (заводские), бортовые, контактные, транспортные сети. На средних длинах ЛЭП *LFAC* характеризуются меньшими затратами и большими габаритами и материалоемкостью (при попытках снизить габариты преобразователей за счет импульсной техники остаются проблемы синхронизации, реактивной мощности, высших гармоник). Современные линии *DC* на средних длинах ЛЭП имеют наилучшие технические характеристики (ТХ), но и наибольшие затраты.

Рост цен на металлы, развитие возобновляемой энергетики, ужесточение экологических и сетевых нормативов требуют высоких технических характеристик сети при приемлемой стоимости. Пример – имеющееся в мире число ПК не могло бы быть достигнуто при использовании 50 Гц блоков питания, так как для этого не хватило бы мировых запасов меди и железа. Именно этот компромисс позволяют обеспечить сети повышенной частоты (СПЧ, *HFAC*) в области малых длин ЛЭП. Обеспечивая, аналогично *LFAC* и *DC*, высокий КПД ЛЭП за счет высокого напряжения, СПЧ так же просты и экономичны, поскольку сохраняются трансформаторные преобразователи малых габаритов и материалоемкости из-за высокой частоты, отсутствуют сложные конверторы *AC/DC/AC*, *DC/AC/DC*. Трансформаторный преобразователь более надежен по сравнению с импульсным преобразователем (ИП).

Впервые сеть повышенной частоты была внедрена советскими авиаконструкторами КБ Мясищева как бортовая сеть 400 Гц 208/120 В для снижения веса самолета М-50 [3]. СПЧ получили развитие во второй половине XX века [4].

При получении энергии из других видов сетей можно использовать резонансные и ШИМ-генераторы. Проблемы СПЧ – излучение, согласование нагрузки – или успешно решаются, например, благодаря бесконтактной передаче электроэнергии компании *VAHLE*, или незначительны при малой площади сети. Наряду с этим СПЧ имеет уникальную возможность, которой лишены *LFAC* и *DC*-сети, – передачу энергии через различные объекты и среды (вакуум, проводники, диэлектрики, полупроводники, магнетики и др.). При высокой частоте работают оба типа проводимости – активная и реактивная, характерные для реальной среды (зем-

ли, воды и др.). Это позволяет строить эффективные однопроводные ЛЭП с возвратом через землю (ОЛВЗ/*SWER*) или использовать в качестве тоководов и заземлителей СПЧ различные объекты – трубопроводы, электроды станций катодной защиты (СКЗ), контуры заземления зданий и др. Кроме стандартных глубинных могут быть задействованы поверхностные площадные заземления и передача энергии с помощью резонансной однопроводной системы (РОС), разработанной в ВИЭСХ, через плохо проводящие грунты [5-7].

Многофункциональность заземлителей снижает материалоемкость системы.

СПЧ ОЛВЗ имеет максимальную эффективность среди однопроводных ЛЭП всех типов [7, 8].

Используемые многие десятилетия однопроводные системы 60 Гц (>300 кВА, >80 кВ, >200 тыс. км) эффективны только для хорошо проводящих почв и при высококачественном заземлении, например, экстразаглубление для сухих почв в Австралии. В однопроводных ЛПТ требования к заземлению еще более высоки: катод – медь, анод – графит или титан. Все эти меры, применяемые в обычных системах НЧЛЭП и ЛПТ, не позволяют достичь таких высоких КПД как для ОЛВЗ повышенной частоты. Причина эффективности ОЛВЗ СПЧ заключается в том, что с повышением частоты сопротивление диэлектрических компонентов почвы падает.

Цель работы – исследование влияния переменного напряжения повышенной частоты на эффективность передачи электрической энергии через плохо проводящие грунты и коррозию заземлителей в однопроводной линии электропередачи.

Материалы и методы. Классическая формула сопротивления среды R между двумя шаровыми электродами радиуса, погруженными в безграничную однородную среду с удельной электропроводностью, показывает, что сопротивление не зависит от расстояния между электродами даже для постоянного тока [9]:

$$R = \frac{u}{i} = \frac{1}{2\pi a \lambda},$$

где u – напряжение, α – радиус, λ – электропроводность между электродами.

В реальности это невыполнимо из-за наличия в Земле мощных слоев диэлектриков с $\lambda = 0$. Это гравий, пески, граниты, сухие почвы и др. Именно поэтому для НЧЛЭП и ЛПТ однопроводные системы сталкиваются с проблемами «λ почвы и качества заземления». РОС повышенной частоты с ростом частоты перестает зависеть от этого параметра.

Ниже приведен пример однопроводной линии, которая из-за наличия диэлектрического пласта (например, кремнеземы, пески SiO_2) не будет работать как однопроводная ЛЭП 50Гц или ЛПТ, но

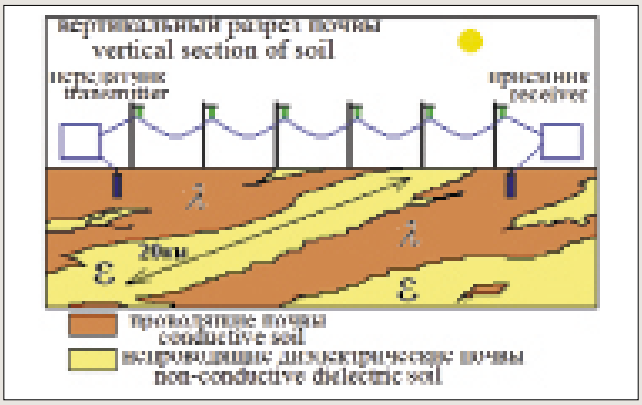


Рис. 1. Принцип передачи электроэнергии по одному проводу через непроводящие грунты

Fig. 1. Principle of single-wire electricity transmission through non-conductive grounds

сможет функционировать как ЛПЧ [10]. Рассмотрим пример, включающий мощную прослойку полностью непроводящего ($\lambda > 0$, гранит, песок и т.п.) диэлектрика между электродами заземления приемника и передатчика (*рис. 1*).

Сопротивление грунта для случая НЧ и ЛПТ ЛЭП равно:

$$R = \frac{1}{2\pi a \lambda}.$$

Для диэлектрика (кремнезем сухой) $\lambda = 0$; $R = \infty$, то есть линия не проводит энергию. При этом КПД линии равен 0%.

Сопротивление грунта для случая ВЧ ЛЭП (ВЧ РОС, СПЧ):

$$X_c = \frac{1}{4\pi^2 a f \varepsilon \varepsilon_0} = \frac{1}{4\pi^2 20000\,м \cdot 10000\,Гц \cdot 4 \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\,Ф/м} \approx 3{,}5\,Ом,$$

где ε – диэлектрическая проницаемость;

f – рабочая частота, при этом для кремнезема использованы величины: $\varepsilon = 4$; $f = 10$ кГц; $\alpha = 20$ км.

Потери для линии 30 км, 10 кВт, 1 кВ составляют: $P_п = I^2R = (P/U)^2R \simeq (10000\ Вт/1000\ В)^2 \cdot 3{,}5\ Ом = 350\ Вт$.

КПД линии равен 96,5% (350 Вт/10000 Вт), если учитывать только реактивную проводимость. Но в реальности прибавится обычная активная проводимость, в том числе проводимость электролитов почвенных вод, при этом КПД растет [11].

Уточняющие расчеты могут быть проведены с помощью классической физики, где среда моделируется несовершенными магнетиками и диэлектриками, то есть обладает комплексными диэлектрическими и магнитными проницаемостями. Конечно, в окружающем физическом мире все величины реальные, и комплексный подход – это только удобный математический метод, позволяющий одновременно рассчитывать оба типа проводимости – ак-

тивную и реактивную, так как они входят в одно комплексное число как его реальная и мнимая части [12]. Метод предложен А. Прессом в 1922 г. и применяется до настоящего времени. Для линий с возвратом тока через землю теоретический расчет проводимости земли, в том числе с применением ПО, очень сложен, так как параметры среды неравномерно распределены и нестационарны. Уровень сложности расчета аналогичен расчету в магнито- и электроразведке и расчету проводимости и проницаемости плазмы, поэтому необходим эксперимент.

Результаты и обсуждение. Проблема коррозии заземляющих электродов уменьшается или вообще устраняется благодаря высокой частоте напряжения линии. Таким образом, заземлители имеют две функции: электродов в цепи постоянного тока СКЗ и заземлителей в высокочастотной цепи однопроводной ЛЭП. При этом через такой электрод будет протекать высокочастотный ток с нулевой гармоникой (постоянная составляющая), не равной нулю и создающей невысокие постоянные потенциалы на электроде (доли и единицы вольт). Высшие гармоники также не равны нулю и могут превышать нулевую гармонику, но на процессы коррозии они не влияют вследствие высокой частоты. Это подтверждается теорией электролитов [13]. Эффект роста проводимости с повышением частоты (эффект Дебая- Фалькенгагена) обусловлен уменьшением колебания ионов и двух основных эффектов, ответственных за потери в среде и, следовательно, за падение проводимости: электрофоретического эффекта и эффекта асимметрии (релаксации). Электрофоретический эффект обусловлен тем, что навстречу катиону движутся ионы ионной атмосферы, несущие с собой сольватирующие их молекулы растворителя, что создает дополнительное торможение движения центрального иона, сравнимое с ростом вязкости среды [13, 14].

Эффект релаксации – это эффект инерции иона, обусловленной наличием ионной атмосферы и ее инерционностью. При движении центрального иона, например положительного катиона, его отрицательная ионная атмосфера теряет свою шаровидность и становится несимметричной. В покинутой части ионной атмосферы будет преобладать отрицательный заряд, тормозящий движение катиона.

Дополнительно росту проводимости, а значит и уменьшению колебаний ионов, способствует эффект Вина: чем больше напряжение, тем лучше проводимость [13].

В физике данные эффекты могут быть представлены упрощенно: при относительно невысоких токах и напряжениях реактивная емкостная проводимость диэлектриков и электролитов растет, так как она прямо пропорциональна частоте $1/X_c = 2\pi fC$.

Этот рост обусловлен уменьшением периода колебаний заряженных частиц и, следовательно, сокращением активных потерь при возрастающей частоте.

Ток повышенной частоты не влияет на движения заряженных частиц, которые и определяют коррозионные и антикоррозионные процессы. Наоборот, возможен обратный эффект – затруднение движения заряженных частиц, как полярных, так и неполярных, а следовательно, замедление коррозии. Согласно принципу наименьшей энергии, частице «невыгодно» тратить энергию на дополнительное движение, так как она уже вовлечена в периодическое высокочастотное движение (колебание) электромагнитной волной, передающей энергию через среду. Здесь уместна аналогия с грузом маятника Капицы-Арцимовича, который не идет вниз, так как вовлечен в реактивный циклический обмен энергии с генератором.

Для подтверждения полученных выше данных проведены оценки коррозионных повреждений стальных электродов, размещенных в электролите на токах различной частоты. Электролит – 5-10-процентный раствор соли в воде (*рис. 2, 3*). Для генерации переменного биполярного напряжения использованы мостовые инверторы (форма сигнала напряжения – биполярные прямоугольники). Максимальный ток во всех режимах для всех частот достигает 8-10 мА при отсутствии соли в воде. В соляном растворе напряжение настроено так, чтобы величина рабочих токов составляла 60-80 мА.

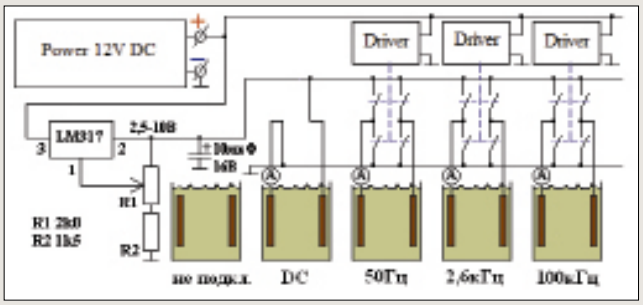


Рис. 2. Схема установки для испытания электродов
Fig. 2. Electrode testing unit

На основе экспериментальной проверки установлено, что электроды, размещенные в растворе электролита без подключения к генератору напряжения, уменьшили свою массу на 0,3%. В случае подключения к источнику постоянного напряжения катод увеличил массу на 1%, анод уменьшил массу на 35%. При подключении электродов к переменному напряжению масса электродов становится легче в среднем на 1-1,5%.

В результате экспериментов было установлено, что на повышенной частоте 2,6 и 100 кГц разница в коррозии электродов уменьшается на 15-20% по сравнению с частотой 50 Гц, а по сравнению с по-

Table Таблица

Результаты испытаний электродов
Electrode test results

Режим проверки (частота тока) Test mode (current frequency)	Не подключены Not connected		DC		47,98 Гц / Hz		2,6 кГц/ кHz		100,7 кГц/ кHz	
Ток и напряжение, мА/ В Current and voltage, mA/V	–		65/1,57		80/1,60		82/1,35		60/1,32	
Масса электродов, г: Electrodes weight, g m_0 до эксперимента m_0 before the experiment (22.05.14)	108,53	108,76	72,08	79,09	76,61	85,44	73,40	82,30	69,56	78,14
m_1 после эксперимента m_1 after experiment (17.06.14)	108,67	108,91	67,03	81,66	76,63	85,72	73,36	82,61	69,65	78,23
$\Delta m_1 = m_1 - m_0$	0,14	0,15	–5,05	2,57	0,02	0,28	–0,04	0,31	0,09	0,09
m_2 после эксперимента после очистки m_2 after the experiment after cleaning (17.06.14)	108,22	108,44	46,75	79,17	76,22	84,98	73,01	81,92	69,20	77,79
$\Delta m_2 = m_2 - m_0$	–0,31	–0,32	–25,33	0,08	–0,39	–0,46	–0,39	–0,38	–0,36	–0,35

Рис. 3. Генераторы и размещение электродов в течение эксперимента
Fig. 3. Generators and placement of electrodes during the experiment

Рис. 4. Взвешивание и сушка электродов
Fig. 4. Weighing and drying electrodes

Рис. 5. Разрушение положительного электрода при постоянном токе
Fig. 5. Destruction of positive electrode on a direct current

стоянным током – в 60 раз (*таблица*). Следовательно, повышенная частота не усиливает коррозионные процессы (*рис. 3-5*). Для уменьшения металлоемкости однопроводной системы электроснабжения можно использовать как заземляющие электроды, так и непосредственно сельскохозяйственные объекты, например трубопроводы.

Выводы. Применение повышенной частоты для передачи электрической энергии позволяет использовать контуры заземления зданий и других объектов в качестве заземлителей в однопроводных си-

стемах передачи электрической энергии без увеличения коррозионных потерь. При передаче электрической энергии на повышенной частоте до 10 кГц эффективность передачи электрической энергии через сухой кремнезем составляет 96%. Одновременно с этими преимуществами применение систем повышенной частоты позволяет снизить затраты вследствие снижения массы и габаритов оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Люди русской науки: Очерки о выдающихся деятелях естествознания и техники / Под ред. С.И. Вавилова. М., Л.: Гос. изд-во техн.-теоретической литературы. 1948.
2. Терентьев И.Э., Шадрина Н.О., Уфа Р.А. Анализ технологий высоковольтной передачи энергии постоянным током (ВППТ). Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. URL: https://www.scienceforum.ru/2015/pdf/12905.pdf (дата обращения – 26.08.2017).
3. Козлов П.Я. Конструктор. М.: Машиностроение, 1989. С. 9-10.
4. Львов А.П. Электрические сети повышенной частоты. М.: Энергоиздат, 1981. 104 с.
5. Стребков Д.С., Некрасов А.И. Резонансные методы передачи электрической энергии. М.: ВИЭСХ, 2013. 584 с.
6. Стребков Д.С., Некрасов А.И., Трубников В.З. Резонансная система передачи электрической энергии // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Томск, ТПУ, 2010. С. 205-207.
7. Юферев Л.Ю., Рощин О.А., Александров Д.В., Соколов А.В. Исследование резонансной системы передачи электроэнергии на повышенной частоте // Альтернативная энергетика и экология. 2014. N8 (148). С. 89-93.
8. Юферев Л.Ю., Рощин О.А., Александров Д.В. Основные проблемы и их устранение при проектировании РОС // Инновации в сельском хозяйстве. 2013. N1 (3). С. 18-24.
9. Калашников С.Г. Электричество. М.: Физматлит, 2004. 624 с.
10. Александров Д.В., Юферев Л.Ю. Возможность применения резонансной системы электропитания для катодной защиты // Инновации в сельском хозяйстве. 2012. N2 (2). С. 46-53.
11. Флоренский П.А. Диэлектрики и их техническое применение. М.: Р.И.О. Главэлектро ВСНХ, 1924. С. 206.
12. Скорчелетти В.В. Теоретическая электрохимия. Л.: Госхимиздат, 1963. 610 с.
13. Эткинс П. Физическая химия. Т. 2. М.: Мир, 1980. 584 с.

REFERENCES

1. Lyudi russkoy nauki: Ocherki o vydayushchikhsya deyatelyakh estestvoznaniya i tekhniki [People of the Russian science: Stories about outstanding figures of natural sciences and engineering]. Editor S.I. Vavilov. Moscow, Leningrad: Gos. izd-vo tekhn.-teoreticheskoy literatury. 1948. (In Russian)
2. Terent'ev I.E., Shadrina N.O., Ufa R.A. Analiz tekhnologiy vysokovol'tnoy peredachi energii postoyannym tokom (VPPT) [Analysis of HVDC system]. National Research Tomsk Polytechnic University, 2013. URL: https://www.scienceforum.ru/2015/pdf/12905.pdf (accessed 26.08.2017). (In Russian)
3. Kozlov P.Ya. Konstruktor [Design engineer]. Moscow: Mashinostroenie, 1989: 9-10. (In Russian)
4. L'vov A.P. Elektricheskie seti povyshennoy chastoty [High-frequency networks]. Moscow: Energoizdat, 1981: 104. (In Russian)
5. Strebkov D.S., Nekrasov A.I. Rezonansnye metody peredachi elektricheskoy energii [Resonant methods of electric energy transfer]. Moscow: VIESKh, 2013: 584. (In Russian)
6. Strebkov D.S., Nekrasov A.I., Trubnikov V.Z. Resonant system of electric energy transfer. Elektroenergiya: ot polucheniya i raspredeleniya do effektivnogo ispol'zovaniya: Materialy Vserossiyskoy nauchno- tekhnicheskoy konferentsii. Tomsk, TPU, 2010. S. 205-207. (In Russian)
7. Yuferev L.Yu., Roshchin O.A., Aleksandrov D.V., Sokolov A.V. Research of resonant system of transfer of the electric power at an increased frequency. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya (ISJAEE)*. 2014; 8 (148): 89-93. (In Russian)
8. Yuferev L.Yu., Roshchin O.A., Aleksandrov D.V. Main problems and elimination of them at resonant single-wire transmission system design. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2013; 1 (3): 18-24. (In Russian)
9. Kalashnikov S.G. Elektrichestvo [Electricity]. Moscow: Fizmatlit, 2004: 624. (In Russian)
10. Aleksandrov D.V., Yuferev L.Yu. Possibility of use of resonant power supply system for cathode protection. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2012; 2 (2) 46-53. (In Russian)
11. Florenskiy P.A. Dielektriki i ikh tekhnicheskoe primenenie [Dielectrics and technical application of them]. Moscow: R.I.O. Glavelektro VSNKh, 1924: 206. (In Russian)
12. Skorcheletti V.V. Teoreticheskaya elektrokhimiya [Theoretical electrochemistry]. Leningrad: Goskhimizdat, 1963: 610. (In Russian)
13. Etkins P. Fizicheskaya khimiya [Physical chemistry]. Vol. 2. Moscow: Mir, 1980: 584. (In Russian)

Критерии авторства. Автор несет ответственность за представленные в статье сведения и плагиат.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Contribution. The author is responsible for information and plagiarism avoiding.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

УДК 631.358:633.521 DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-20-23

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ИНТЕНСИВНОСТИ ОТРЫВА КОРОБОЧЕК ЛЬНА ПРИ РАБОТЕ ОЧЕСЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Черников В.Г.[1,2]*,
член-корр. РАН, докт. техн. наук, профессор;

Ростовцев Р.А.[1],
докт. техн. наук, профессор

[1]Всероссийский научно-исследовательский институт механизации льноводства, Комсомольский проспект, 17/56, г. Тверь, 170041, Российская Федерация, *e-mail: vniiml1@mail.ru
[2]Тверская государственная сельскохозяйственная академия, ул. Маршала Василевского, 7, пос. Сахарово, г. Тверь, 170904, Российская Федерация

Уборка льна состоит из ряда последовательных технологических процессов: теребления, отделения семенных коробочек от стеблей, расстила стеблей, оборачивания стеблей во время вылежки, подбора их и прессования в крупные упаковки, погрузка и транспортирование паковок. Особое место среди перечисленных выше операций, в значительной мере определяющих качество получаемой продукции, занимает отделение семенных коробочек от стеблей. Определение параметра интенсивности отрыва коробочек льна при работе очесывающего устройства мало изучено. Параметр интенсивности отрыва не показывает в явном виде его зависимость от конструктивных особенностей и режима работы очесывающего устройства. Рассмотрели эту связь на примере гребневого очесывающего аппарата, у которого зубья на гребне различные, со случайно уменьшающимся шагом от начала к концу. Существующие очесывающие аппараты не обеспечивают качественного очеса стеблей льна. Поэтому проведены теоретические и экспериментальные исследования гребневого очесывающего аппарата. Разработаны программа и методика исследований очесывающего аппарата. Рассмотрены теоретические основы интенсивности очеса гребневым очесывающим аппаратом. Определены факторы, влияющие на повреждаемость стеблей: геометрические параметры зубьев, число одновременно работающих гребней, последовательность очеса, соотношение скоростей зубьев и зажимного транспортера. К факторам, влияющим на интенсивность очеса, относятся характеристики очесываемого слоя, степень созревания льна, средневзвешенные значения эффективности одиночного воздействия. В льноуборочных комбайнах ЛК-4А и ЛКВ-4А с повышением частоты очесывающего аппарата до 2,87 об/мин и скорости зажимного транспортера от 1,54 до 1,58 м/с интенсивность снизилась до 3,02 зуб./см, а чистота очеса повысилась до 98 процентов. На основании этого следует считать интенсивность 3,02 зуб./см как минимально допустимую, и чистота очеса может быть повышена не более чем на 2 процента.

Ключевые слова: льноуборочный комбайн, гребневой очесывающий аппарат, зубья, стебли льна, семенные коробочки.

Для цитирования: Черников В.Г., Ростовцев Р.А. Определение параметра интенсивности отрыва коробочек льна при работе очесывающего устройства // *Сельскохозяйственные машины и технологии.* 2017. N2. С. 20-23

DETERMINATION OF PARAMETER OF INTENSITY OF FLAX BALLS SEPARATION DURING COMB DESEEDER OPERATION

Chernikov V.G.[1,2]*,
corr. member of PAS, Dr. Sc. (Eng.);

Rostovtsev R.A.[1],
Dr. Sc. (Eng.)

[1]All-Russia Research Institute for Flax Production Mechanization, Komsomol'skiy prospekt, 17/56, Tver, 170041, Russian Federation, *e-mail: vniiml1@mail.ru
[2]Tver State Agricultural Academy, Marshala Vasilevskogo St., 7, set. Sakharovo, Tver, 170904, Russian Federation

Flax harvesting consists of serial technological processes: pulling, separation of seed bolls from stalks, stalks spreading out, turning during a rest, picking up of them and baling in large packages, loading, and transportation. One of the most important operations is seed balls separation from stalks. Determination of parameter of intensity of flex balls combing by deseeder operation is a little studied. Parameter of intensity of a separation doesn't show clearly its dependence on design features and an operating mode of the unit. The authors considered this relation by the example of the comb deseeder which has different tines on a ridge with accidentally decreasing spacing towards the end. The existing deseeders do not provide

qualitative combings of flax stalks. Therefore, theoretical and pilot researches of the ridge comb deseeder were conducted. The program and a technique of researches of the comb deseeder were developed. The theoretical basics of intensity of combing by the comb deseeder are covered. The various factors influence damageability of stalks: geometrical parameters of tines, number of at the same time operating combs, sequence of combing, ratio of tines speeds and gripping conveyor. Characteristics of a combed layer, a flax maturing level, the weight-average values of efficiency of single influence belong to the factors influencing intensity of combing. In the flax harvesters LK-4A and LKV-4A with increase in frequency of the comb deseeder to 2.87 rpm and speeds of the gripping conveyor from 1.54 to 1.58 meter per second the intensity decreased up to 3.02 tine per centimeter, and combing purity increased up to 98 percent. So, intensity 3.02 tine per centimeter should be considered as minimum admissible, and combing purity should be increased no more than by 2 percent.

Keywords: Flax harvester; Ridge comb deseeder; Tines; Flax stalks; Seed bolls.

For citation: Chernikov V.G., Rostovtsev R.A. Determination of parameter of intensity of flax balls separation during comb deseeder operation. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2017; 4: 20-23. DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-20-23. (In Russian)

Уборка льна состоит из ряда последовательных технологических процессов: теребления стеблей, отделения семенных коробочек от стеблей, расстила стеблей, оборачивания стеблей во время вылежки, подбора их и прессования в крупные упаковки, погрузка и транспортирование паковок. Особое место среди перечисленных выше операций, в значительной мере определяющих качество получаемой продукции, занимает отделение семенных коробочек от стеблей. Определение параметра интенсивности отрыва коробочек льна при работе очесывающего устройства мало изучено.

Цель исследования – определение факторов, влияющих на интенсивность очеса и повреждаемость стеблей льна.

Материалы и методы. Определение интенсивности очеса и режимов соотношения скоростей зубьев и зажимного транспортера относится к процессу теоретических и экспериментальных задач.

Результаты и обсуждение. Параметр интенсивности отрыва и вывода из слоя оторванных коробочек не показывает в явном виде их зависимость от конструктивных особенностей и режимов работы очесывающих устройств. Поэтому установим в общем виде его связь с количеством удельных воздействий, то есть воздействий, приходящихся на единицу длины очесываемого слоя льна за время отработки, и его эффективность (интенсивность) с учетом конструктивных параметров и режимов работы очесывающих устройств [1].

Рассмотрим эту связь на примере гребневого очесывающего аппарата, у которого зубья на гребне размещены со ступенчато уменьшающимся шагом от начала к концу.

Поскольку при очесе зубья гребней очесывающего аппарата внедряются в слой и стебли при движении протаскиваются между ними, процесс отрыва и выделения из слоя семенных коробочек, в отличие от уравнений кинетики, имеет импульсный характер при непрерывном движении ленты льна в камере очеса.

За одну секунду движения через рабочее пространство камеры очеса очесывающего аппарата слой подвергается прочесам гребнями очесывающего барабана [2, 3]:

$$m' = \frac{Z_б Z_Г n}{60}, \quad (1)$$

где $Z_б$ – число барабанов; Z_1 – число гребней на барабане; n – частота вращения очесывающего барабана, мин $^{-1}$.

Тогда число прочесов за время t будет равно:

$$m = \frac{Z_б Z_Г n \cdot t}{60}, \quad (2)$$

где t – время очеса, мин.

Очевидно, что длительность одного прочеса одним гребнем равна

$$t_и = \frac{t}{m}, \quad (3)$$

где m – число прочесов.

Известно, что средняя частота расстановки зубьев на гребне равна [2]:

$$k_Г = \frac{Z_з}{10^2 L_Г}, \quad (4)$$

где $Z_з$ – число зубьев на гребне; $L_Г$ – длина гребня, м.

Тогда число воздействий одним зубом на 1 см очесываемого слоя за время отработки t, или удельное число воздействий (по Б.П. Можарову), равно [2]:

$$Q = m \cdot k_Г = \frac{Z_б Z_Г Z_з n}{60 \cdot 10^2 \cdot L_Г}. \quad (5)$$

Допустим, что $\beta \cdot t = \delta_1 \cdot m$, (6)

где δ_1 – эффективность одного процесса одним гребнем.

Поскольку при одном процессе $m = 1$ и $t = t_и$, то

с учетом (3) имеем:

$$\beta = \frac{\delta_1 \cdot 1}{t_н} = \frac{\delta_1 \cdot m}{t}, \quad (7)$$

тогда действительно $\beta \cdot t = \delta_1 \cdot m$.

Докажем, что при однородных воздействиях, когда $\delta = const$,

$$\delta_1 \cdot m = \delta \cdot Q = \beta \cdot t, \quad (8)$$

где δ – эффективность одного воздействия одним зубом на 1 см слоя льна при шаге между зубьями $t_з = const$.

Из (8) с учетом (5) имеем:

$$\frac{\delta_1}{\delta} = \frac{Q}{m} = k_Г, \text{ откуда } \delta = \frac{\delta_1}{k_Г}. \quad (9)$$

Но из (7) видим, что $\delta_1 = \beta \cdot t_н$, тогда с учетом (3) находим, что

$$\delta = \frac{\beta \cdot t_н}{k_Г} = \frac{\beta \cdot t}{m \cdot k_Г} = \frac{\beta \cdot t}{Q}$$

и, следовательно, при однородных воздействиях

$$\delta \cdot Q = \beta \cdot t. \quad (10)$$

Тогда в соответствии с равенством (10) выражение показателя чистоты очеса для случая неоднородных воздействий зубьями можем записать:

$$Э(Q) = 1 - e^{-\bar{\delta} Q}. \quad (11)$$

Продифференцировав (11) по Q и определив предел при $Q \to 0$, получим:

$$\lim \frac{dЭ(Q)}{dQ} = \lim \bar{\delta} e^{-\bar{\delta} Q} = \bar{\delta}, \quad (12)$$

где $\bar{\delta}$ – средневзвешенное значение интенсивности единичного воздействия для гребня с неравномерной расстановкой зубьев.

Следовательно, при $Q = 1$, что соответствует и щелевому аппарату, показатели недочеса и чистоты очеса можно выразить уравнениями:

$$H_1 = e^{-\bar{\delta}}, \quad (13)$$

$$Э_1 = 1 - H_1 = 1 - e^{-\bar{\delta}} \text{ и. } H_1 = 1 - Э_1. \quad (14)$$

Если рассматривать в первом приближении очес льна как детерминированную механическую модель, то при первом воздействии гребня на элемент слоя длиной 1 см будут очесаны $Э_1$ семенных коробочек от общего их числа x_0. При втором – $Э_2 = Э_1(1–Э_1)$, при третьем – $Э_3 = Э_1(1–Э_1)(1–Э_1)$ и т.д. Следовательно, если после первого воздействия чистота очеса будет $Э_1 = 1–(1–Э_1)^1$, после двух воздействий $Э_2 = Э_1 + Э_1(1–Э_1)$, или $Э_2 = 1–(1–Э_1)^2$, после трех воздействий $Э_3 = 1–(1–Э_1)^3$, то после единичных воздействий чистота его очеса будет равна:

$Э(Q) = 1 – (1 – Э_1)^Q = 1 – H_1^Q$.

Тогда с учетом (13) и (14) будем иметь:

$$Э(Q) = 1 - (e^{-\bar{\delta}})^Q = 1 - e^{-\bar{\delta} Q} \text{ и } H(Q) = e^{-\bar{\delta} Q}. \quad (15)$$

Как видим, получено выражение, аналогичное (11), поэтому равенство (10) справедливо.

Прологарифмировав (13), находим, что

$$\bar{\delta} = -\ln H_1. \quad (16)$$

Таким образом, в импульсном процессе очеса льна гребнем со ступенчато убывающим шагом зубьев средневзвешенное значение технологической константы равно натуральному логарифму недоочеса от единичного воздействия.

Тогда выражение чистоты очеса (11) можно написать в виде:

$$Э(Q) = 1 - e^{\ln H_1 Q}. \quad (17)$$

С целью проверки из (15) находим, что

$$1 - Э(Q) = (1 - Э_1)^Q. \quad (18)$$

Прологарифмировав (18), найдем значение Q:

$$\ln[1 - Э(Q)] = Q \ln(1 - Э_1),$$

откуда:

$$Q = \frac{\ln[1 - Э(Q)]}{\ln(1 - Э_1)} = \frac{\ln H(Q)}{\ln H_1}. \quad (19)$$

Но поскольку из (16) следует, что $\ln H_1 = -\bar{\delta}$, то $-\bar{\delta} \cdot Q = \ln H(Q) = \ln[1–Э(Q)]$. Потенцируя последнее выражение и преобразуя его, получаем:

$Э(Q) = 1 - e^{-\bar{\delta} Q}$, что аналогично (11). Значения H_1 и определяют экспериментально.

Из (11) и (12) следует, что характер протекания процесса очеса льна определяется средневзвешенным значением эффективности единичного воздействия. Чем выше эта эффективность, тем быстрее, при меньшем числе воздействий Q, будет отделена от стеблей заданная часть семенных коробочек, то есть достигнута установленная агротехническими требованиями технологическая эффективность процесса – чистота очеса – $Э(Q)$ (*см. рисунок*).

Следовательно, для данного рабочего органа с его конструктивными параметрами, режимом работы, характеристиками очесываемого слоя и другими факторами (условиями) средневзвешенная интенсивность единичного воздействия $-\bar{\delta}$ действительно является единственной физической константой, предписывающей кинетику процесса очеса льна.

Поэтому, при прочих равных условиях, должно соблюдаться условие:

$$Э(Q) = 1 - e^{-\bar{\delta} Q}$$

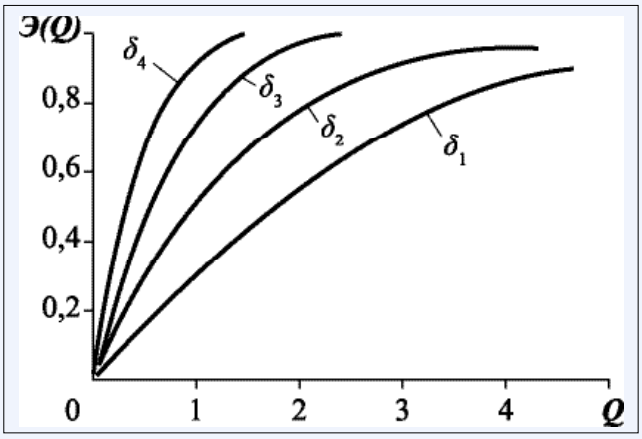


Рис. Зависимость чистоты очеса от δ и Q ($\delta_1 < \delta_2 < \delta_3 < \delta_4$)
Fig. Depending of combing cleanliness on δ and Q ($\delta_1 < \delta_2 < \delta_3 < \delta_4$)

или

$$\frac{\bar{\delta}_1}{\bar{\delta}_2} = \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (20)$$

Из (20) следует, что если у двух очесывающих аппаратов имеет место $\bar{\delta}_2 < \bar{\delta}_1$, то для обеспечения той же эффективности процесса (чистоты очеса) у аппарата с интенсивностью единичного воздействия $\bar{\delta}$ количество воздействий должно быть Q_2, причем $Q_2 > Q_1$.

Наконец, из выражений (13), (10) и (15) определим интенсивность процесса – β.

Если $H(Q) = e^{-\beta Q}$ и $H(t) = e^{-\beta 4}$, то при $\beta \cdot t = \bar{\delta} Q$ получим $H(Q) = H(t)$. Логарифмируя и преобразуя это выражение, находим:

$$\beta = -\frac{\ln H(Q)}{t}. \quad (21)$$

Выводы. В льноуборочных комбайнах ЛК-4А и ЛКВ-4А с повышением частоты очесывающего аппарата до $n = 2{,}87$ мин$^{-1}$ и скорости зажимного транспортера с $V_{тр} = 1{,}54$ до $V_{тр} = 1{,}58$ м/с интенсивность снизилась до $Q = 3{,}02$ зуб./см, а чистота очеса до 98%. На основании этих данных, по мнению Б.П. Можарова, интенсивность $Q = 3{,}02$ зуб./см следует рассматривать как минимально допустимую. Но и значительное повышение интенсивности очеса нерационально, так как с ее увеличением чистота очеса может быть повышена не более чем на 2%, а увеличение числа воздействий на стебли может привести к значительному росту их повреждаемости. Кроме отмеченных факторов, на повреждаемость стеблей оказывают влияние по той же причине параметры зубьев, число одновременно работающих гребней, последовательность очеса, соотношение скоростей зубьев и зажимного транспортера. За предельную скорость зубьев при очесе свежевытеребленного льна принята скорость 9 м/с. Влияние этих факторов нами учтено при конструировании очесывающих аппаратов выпускаемых машин [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черников В.Г., Порфирьев С.Г., Ростовцев Р.А. Очесывающие аппараты льноуборочных машин. Монография. М., 2004. 305 с.

2. Можаров Б.П. Исследование, обоснование и разработка аппаратов для обмолота льна-долгунца: Дис. … канд. техн. наук. М.: ВИСХОМ, 1968. 128 с.

3. Шлыков М.И. Льноуборочный комбайн. М.: Машгиз, 1949. 300 с.

4. Черников В.Г., Романенко В.Ю., Андрощук В.С., Шишин Д.А. Пути повышения надежности льноуборочных машин // Техника и оборудование для села. 2017. N2(236). С. 30-33.

REFERENCES

1. Chernikov V.G., Porfir'ev S.G., Rostovtsev R.A. Ochesyvayushchie apparaty l'nouborochnykh mashin [Combing units of flax harvesters]. Monografiya. Moscow, 2004: 305. (In Russian)

2. Mozharov B.P. Issledovanie, obosnovanie i razrabotka apparatov dlya obmolota l'na-dolguntsa [Research, justification and working out of units for fiber flax thresh]: Dis. … kand. tekhn. nauk. Moscow: VISKhOM, 1968: 128. (In Russian)

3. Shlykov M.I. L'nouborochnyy kombayn [Flax harvester]. Moscow: Mashgiz, 1949: 300. (In Russian)

4. Chernikov V.G., Romanenko V.Yu., Androshchuk V.S., Shishin D.A. Ways to improve reliability of flax harvesters. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2017; 2(236): 30-33. (In Russian)

Критерии авторства. Все авторы несут ответственность за представленные в статье сведения и плагиат.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution. The authors are responsible for information and plagiarism avoiding.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

УДК 631.431.73+004.032.26 DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-24-30

ИСКУССТВЕННАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ХОДОВЫХ СИСТЕМ ТРАКТОРОВ

Кузьмин В.А.*; **Федоткин Р.С.,** канд. техн. наук; **Крючков В.А.,** канд. техн. наук

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 1-й Институтский проезд, 5, Москва, 109428, Российская Федерация, *e-mail: kuzmin.viktor92@mail.ru

Одним из важнейших качеств, определяющих компоновку ходовой системы машины на стадии проектирования, является уплотняющее воздействие на почву. Однако отечественные нормативы этого воздействия не отвечают в полной мере требованиям современного сельского хозяйства. Обоснована необходимость анализа ходовых систем тяговых и транспортных машин, а также рекомендаций по выбору параметров для вновь создаваемой или модернизируемой техники. Разработана база данных гусеничных сельскохозяйственных тракторов с учетом параметров: тягового класса, эксплуатационного веса, номинальной мощности двигателя, среднего давления на почву, площади контактной поверхности опорной ветви гусеницы. Машины были разделены на группы по странам-производителям: Европа/Северная Америка и РФ/СНГ. Построены основные графические зависимости для каждой из групп машин, а также сформированы соответствующие аналитические зависимости в интервалах с наибольшей концентрацией машин. Отметили, что с целью упрощения процедуры получения параметров уплотняющего воздействия тракторов на почву целесообразно использовать программный инструмент – искусственная нейронная сеть (или персептрон). Установили, что для решения этой задачи необходимо применить многослойный персептрон (MLP) – нейтронная сеть прямого распространения сигналов (без обратной связи). Осуществить анализ параметров ходовых систем с учетом их уплотняющих воздействий на почву и рекомендовать выбор этих параметров для вновь создаваемых машин. Разработан программный код искусственной нейронной сети. На основе сформированной базы тракторов создана и протестирована искусственная нейронная сеть. Накопленная погрешность не превышает 5 процентов, что говорит о достоверности полученных в ходе расчета искусственной нейронной сети результатов и надежности инструмента. Показали, что, оперируя исходной информацией из массива заложенных в базу данных, можно определить недостающие данные с помощью разработанной искусственной нейронной сети.

Ключевые слова: сельскохозяйственный трактор, ходовая система, резиноармированная гусеница, уплотняющее воздействие на почву, база данных сельскохозяйственных тракторов, искусственная нейронная сеть.

Для цитирования: Кузьмин В.А., Федоткин Р.С., Крючков В.А. Искусственная нейронная сеть для обоснования параметров ходовых систем тракторов / *Сельскохозяйственные машины и технологии.* 2017. N4. С.24-30

ARTIFICIAL NEURAL NETWORK APPLYING FOR JUSTIFICATION OF TRACTORS UNDERCARRIAGES PARAMETERS

Kuz'min V.A.*; **Fedotkin R.S.,** Cand. Sci. (Eng.); **Kryuchkov V.A.,** Cand. Sci. (Eng.)

Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM, 1-st Institutskiy proezd, 5, Moscow, 109428, Russian Federation, *e-mail: kuzmin.viktor92@mail.ru

One of the most important properties that determine undercarriage layout on design stage is the soil compaction effect. Existing domestic standards of undercarriages impact to soil do not meet modern agricultural requirements completely. The authors justify the need for analysis of traction and transportation machines travel systems and recommendations for these parameters applied to machines that are on design or modernization stage. The database of crawler agricultural tractors particularly in such parameters as traction class and basic operational weight, engine power rating, average ground pressure, square of track basic branch surface area was modeled. Meanwhile the considered machines were divided into two groups by producing countries: Europe/North America and Russian Federation/CIS. The main graphical dependences for every group of machines are plotted, and the conforming analytical dependences within the ranges with greatest concentration of machines are generated. To make the procedure of obtaining parameters of the soil panning by tractors

easier it is expedient to use the program tool – artificial neural network (or perceptron). It is necessary to apply to the solution of this task multilayered perceptron – neutron network of direct distribution of signals (without feedback). To carry out the analysis of parameters of running systems taking into account parameters of the soil panning by them and to recommend the choice of these parameters for newly created machines. The program code of artificial neural network is developed. On the basis of the created base of tractors the artificial neural network was created and tested. Accumulated error was not more than 5 percent. These data indicate the results accuracy and tool reliability. It is possible by operating initial design-data base and using the designed artificial neural network to define missing parameters.

Keywords: Agricultural tractor; Undercarriage; Rubber-reinforced track; Soil compaction effect; Agricultural tractor data base; Artificial neural network.

For citaton: Kuz'min V.A., Fedotkin R.S., Kryuchkov V.A. Artificial neural network applying for justification of tractors undercarriages parameters. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2017; 4: 24-30. DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-24-30. (In Russian)

Переуплотнение почвы снижает ее репродуктивные свойства и урожайность культур [1]. Уплотняющее воздействие на почву (УВП) необходимо учитывать при проектировании ходовой системы (ХС) гусеничных машин.

Существующая система стандартов (ГОСТ 26953-86, 26954-86, 26955-86) устарела в связи с изменившимися требованиями к энергонасыщенности и массово-габаритным характеристикам современных машин.

На сегодняшний день не существует единого критерия рациональных параметров ХС с учетом их УВП. Более того, отсутствует инструмент автоматического выбора указанных параметров, который необходим на стадии проработки и анализа общей компоновки вновь создаваемых или модернизируемых машин.

Цель работы – создание инструмента анализа параметров ходовых систем с учетом их уплотняющего воздействия на почву, конструктивных решений в тяговых и транспортных машинах, а также вывод рекомендаций по выбору критериев для вновь создаваемых или модернизируемых машин.

Материалы и методы. Для достижения указанной цели предполагается решение следующих задач:

- определение ключевых параметров ХС машин;
- создание базы данных (БД) параметров ХС машин;
- разработка программного кода искусственной нейронной сети (ИНС);
- интегрирование БД параметров ХС машин в ИНС (обучение);
- тестирование ИНС и сведение к минимуму накопленной погрешности;
- взаимная интеграция ИНС по колесным и гусеничным машинам.

В исследовании определены ключевые параметры конструкции ХС с учетом УВП гусеничных сельскохозяйственных тракторов зарубежного производства – общего назначения, универсальных и универсально-пропашных [2]. Разработана соответствующая БД и программный код ИНС. Проведены интегрирование БД в ИНС, тестирование последней. Сведена к минимуму накопленная погрешность.

Важно отметить, что практически все рассмотренные машины зарубежного производства оснащены резиноармированными гусеницами (РАГ), которые дополнительно снижают уровень УВП на 25-30% и увеличивают равномерность распределения давления под опорной ветвью на 28% [3, 4].

Собранные данные обобщены в табличную форму БД в *MS Access*.

Для создания ИНС использовали *CAM*-систему *MatLab*, в частности модуль *Neural Network Toolbox*.

Алгоритм работы ИНС включает: загрузку исходных данных из файла *data.mdb*, указание критериев обучения, предварительную обработку данных, настройку, описание архитектуры и параметров, инициализацию, цикл обучения, формирование итоговых весов и смещений, тестовое прогнозирование, оценку ошибок прогнозирования.

Для обучения ИНС использовали разработанную и описанную выше БД, включающую в себя около 100 машин.

Результаты и обсуждение. Существующие в настоящее время БД сельскохозяйственных тракторов носят информационно-поисковый характер и служат цели поддержки принятия решения по подбору отечественной и зарубежной техники для поддержания эффективности машинно-тракторного парка, то есть позволяют подобрать необходимые машины под нужды определенного сельхозпредприятия или заказчика по заявленным техническим характеристикам [5-7].

Мы разработали специализированную пополняемую БД гусеничных сельскохозяйственных тракторов отечественного и зарубежного производства, содержащую параметры ХС, необходимые для оценки их УВП.

В дальнейшем в БД предполагается дополнительно учесть также количество и схему расположения опорных катков, расстояние между ними,

тип системы подрессоривания и другие параметры, влияющие на эпюру распределения давления под опорными ветвями гусениц.

В результате анализа параметров УВП в БД гусеничных сельскохозяйственных тракторов определены основные графические зависимости среднего давления на почву от отношения эксплуатационного веса к эффективной мощности q_{cp} ($G_э/N_e$), площади контакта поверхности от величины среднего давления $S_{овг}$ (q_{cp}) и соответствующие им аналитические зависимости (*рис. 1*).

Более значимыми на первый взгляд кажутся зависимости длины и ширины контактной поверхности опорной ветви гусеницы от среднего давления на почву $l_{овг}$ (q_{cp}) и $b_{овг}$ (q_{cp}), однако данные параметры являются многокритериальными, то есть находятся в определенной зависимости не только от уплотняющего воздействия машины на почву. Особенно это характерно для длины $l_{овг}$ контактной поверхности опорной ветви гусеницы, которая определяется в том числе назначением машины и видом выполняемых ею технологических операций, поворачиваемостью, плавностью хода, продольной устойчивостью, навесоспособностью и т.д.

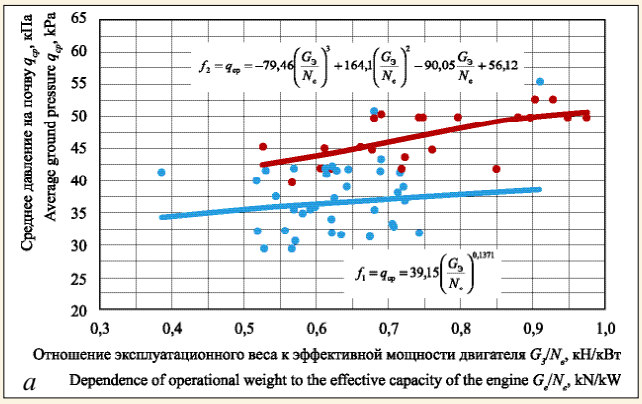
Представленные на *рисунке 1* кривые и соответствующие им аналитические зависимости отражают усредненные зависимости q_{cp} от $G_э/N_e$ для тракторов различного производства. Причем для тракторов производства стран Европы и Северной Америки зависимость справедлива только в зоне наибольшей концентрации моделей тракторов, то есть в диапазоне $G_э/N_e$ = 0,52-0,74 кН/кВт.

Для представленных графиков примечательно, что машины производства стран Европы и Северной Америки при меньшем (в среднем на 10 кПа), по сравнению с машинами производства РФ и стран СНГ, среднем давлении q_{cp} на почву имеют также меньшую площадь контактной поверхности опорной ветви $S_{овг}$ гусениц.

Значения q_{cp} при построении зависимостей определены без учета коэффициента заполнения проекции контакта гусеницы с почвой и приращения шага к длине опорной ветви гусеницы (в отличие от предписанного ГОСТ 26953-86) по формуле: $q_{cp} = G_э/(2l_{овг}\, b_{овг})$.

Расчет выполнен подобным образом для укрупненной оценки показателей УВП различных машин, что на этапе разработки общей компоновки ХС машины вполне достаточно.

Впоследствии в БД гусеничных сельскохозяйственных тракторов будут учтены не только уплотняющее воздействие на почву U, но и максимальное давление на нее q_{max}, коэффициент размера и формы опорной поверхности движителя ω, коэффициент неравномерности распределения давления по опорной поверхности ξ, отношение рассто-



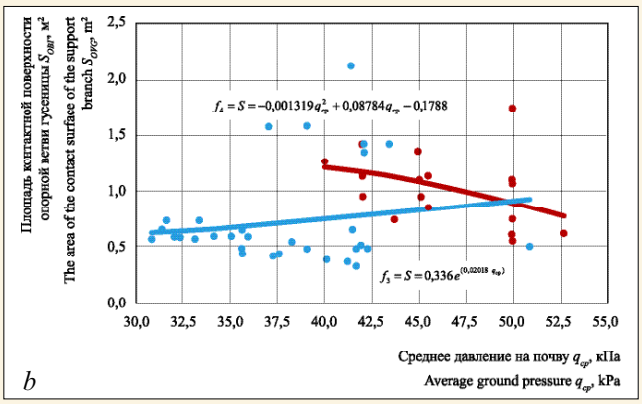


Рис. 1. Графические зависимости параметров УВП для гусеничных сельскохозяйственных тракторов различного производства:

a – зависимость среднего давления на почву q_{cp} от соотношения $G_э/N_e$; b – зависимость площади контактной поверхности опорной ветви гусеницы $S_{овг}$ от среднего давления на почву q_{cp}; $G_э$ – эксплуатационный вес машины, кН; N_e – номинальная мощность двигателя, кВт; n_i и m_i – соотношения параметров q_{cp} и $G_э/N_e$ для трактора производства стран Европы/Северной Америки и РФ/СНГ соответственно; k_i и l_i – соотношения параметров $S_{овг}$ и q_{cp} для трактора производства стран Европы/Северной Америки и РФ/СНГ соответственно; f_1 и f_2 – усредненные зависимости qcp от $G_э/N_e$ для тракторов производства стран Европы/Северной Америки и РФ/СНГ соответственно; f_3 и f_4 – усредненные зависимости $S_{овг}$ от q_{cp} для тракторов производства стран Европы/Северной Америки и РФ/СНГ соответственно

Fig. 1. Graphic depending soil compaction effect parameters tracked agricultural tractors of various production:

a – dependence of the average ground pressure q_{cp} on the ratio $G_э/N_e$; b – dependence of the contact surface of the support branches caterpillars $S_{овг}$ on the average ground pressure q_{cp}; $G_э$ – operating weight of the machine, kN; N_e – engine power rating, kW; n_i and m_i – q_{cp}-to-$G_э/N_e$ relation for tractors produced in Europe/North America and Russia/CIS respectively; k_i and l_i – $S_{овг}$-to-q_{cp} relation for tractors produced in Europe/North America and Russia/CIS respectively; f_1 and f_2 – average $G_э/N_e$-to-q_{cp} relation for tractors produced in Europe/North America and Russia/CIS respectively; f_3 and f_4 – average q_{cp} -to-$S_{овг}$ relation for tractors produced in Europe/North America and Russia/CIS respectively

яния между катками к шагу гусеницы и другие параметры, описанные подробно в работах [1, 8, 9].

Зная соотношение $G_э/N_e$ какого-либо трактора, можно определить параметры УВП, $q_{ср}$ и $S_{овг}$ для аналогичных моделей тракторов зарубежного и отечественного производства на стадии проектирования новых или модернизации существующих ХС.

Полученные аналитические зависимости позволяют определить усредненные значения указанных параметров, причем в диапазоне, ограниченном максимальной концентрацией моделей машин.

С целью упрощения процедуры получения параметров УВП для тракторов различного производства целесообразно использовать программный инструмент, который позволит осуществить их анализ и выбор, в том числе с учетом требуемых на стадии проектирования вариативных условий.

В качестве инструмента может быть использован любой современный язык программирования или *CAM*-система. Однако наиболее подходящим инструментом для решения подобных задач является ИНС. Простейшая ИНС (или персептрон) – математическая модель, ее программно-аппаратное воплощение, построенное по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей. Каждый узел (нейрон) обладает активационной функцией, ответственной за вычисление сигнала на выходе [10, 11].

Однослойный персептрон (персептрон Розенблатта) – однослойная нейронная сеть, все нейроны которой имеют жесткую пороговую функцию активации [12]. Однослойный персептрон имеет простой алгоритм обучения и способен решать лишь самые простые задачи. Эта модель вызвала большой интерес в начале 1960-х годов и стала толчком к развитию искусственных нейронных сетей.

Классический пример такой нейронной сети – однослойный трехнейронный персептрон (*рис. 2а*).

Эта сеть имеет *n* входов, на которые поступают сигналы, идущие по синапсам на 3 нейрона. Нейроны образуют единственный слой данной сети и выдают три выходных сигнала.

Однако для решения нашей задачи требуется немного усложненная сеть, например многослойный персептрон (*MLP*) – нейронная сеть прямого распространения сигнала (без обратных связей), в которой входной сигнал преобразуется в выходной, проходя последовательно через несколько слоев.

Первый из таких слоев называют входным, последний – выходным. Эти слои содержат так называемые вырожденные нейроны и иногда в количестве слоев не учитываются. Кроме входного и выходного слоев, в многослойном персептроне есть один или несколько промежуточных слоев, которые называют скрытыми.

Пример двухслойного персептрона представлен

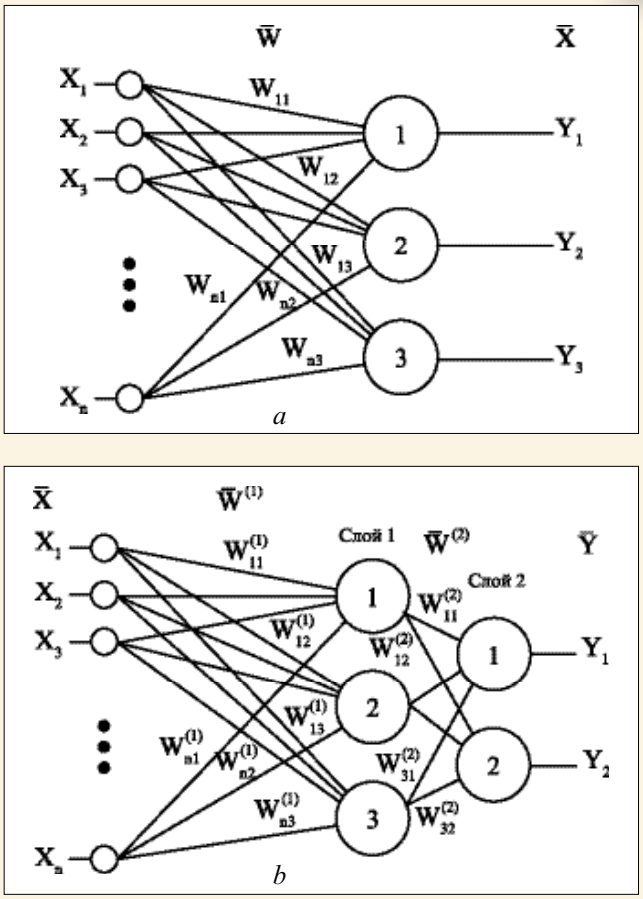


Рис. 2. Персептроны: а – однослойный трехнейронный; b – двухслойный

Fig. 2. Perceptrons: a – single-layer three-neuron; b – dual-layer

на *рисунке 2b*. Сеть имеет *n* входов. На них поступают сигналы, идущие далее по синапсам на 3 нейрона, которые образуют первый слой. Выходные сигналы первого слоя передаются двум нейронам второго слоя. Последние, в свою очередь, выдают два выходных сигнала [12].

В нашем случае используется метод обратного распространения ошибки (*Back propagation, backprop*) – алгоритм обучения многослойных персептронов, основанный на вычислении градиента функции ошибок. В процессе обучения веса нейронов каждого слоя нейросети корректируются с учетом сигналов, поступивших с предыдущего слоя, и невязки каждого слоя, которая вычисляется рекурсивно в обратном направлении от последнего слоя к первому.

Существует множество примеров применения ИНС на практике [13-16]. Например, металлургические компании *Hebei Iron & Steel Group*, *Nippon Steel, Sumitomo Metal Industries* и другие задействуют ИНС в процессах выплавки вторичных металлов из лома, что позволяет, контролируя химсостав сырья, долю добавляемых при плавлении солей, время и температуру плавки, прогнозировать химсостав металла на выходе, а также добиваться минимизации доли шлака, управляя вращением печи и процессом

слива расплава. То есть ИНС позволяет решать и задачи прогнозно-оптимизирующего характера.

Типовая схема работы ИНС, приведенная к рассматриваемому частному случаю, представлена на *рисунке 3.*

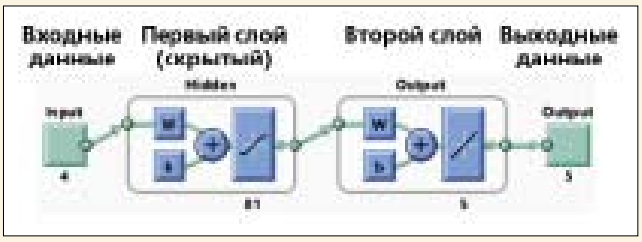


Рис. 3. Типовая схема работы ИНС
Fig. 3. Typical scheme of artificial neural network

На входе подаются 4 значения, например тяговый класс трактора, тип движителя, среднее давление на почву, эксплуатационный вес, а на выходе получается 5 значений, например ширина и длина опорной ветви гусеницы, тип обвода, высота протектора почвозацепа и давление на почву.

Для проверки работоспособности разработанной ИНС в качестве исходных приняты параметры тракторов тягового класса 2-3 и предполагаемое значение среднего давления на почву 40-50 кПа. Графические результаты расчета выходных параметров с помощью разработанной ИНС представлены на *рисунке 4.*

Графики получены путем ИНС-анализа БД тракторов тягового класса 2-3 при среднем давлении на почву 40-50 кПа, построения кривой в соответствующем интервале значений эксплуатационного веса 27-74 кН и аппроксимации кривой в заданном интервале значений эксплуатационного веса.

Разработанная ИНС имеет два слоя. В первом слое в качестве целевой выбрана функция гиперболического тангенса (прим.: функция в *MatLab* запис. «*net.layers{1}.transferFcn='tansig'*») как наиболее точная и создан 81 искусственный нейрон, каждый из которых соответствует переменной в целевом уравнении и умножается на коэффициент аппроксимации. Во втором слое по умолчанию выбрана линейная функция активации, а количество искусственных нейронов соответствует количеству выходных данных. На этапе обучения каждой переменной придается соответствующий коэффициент аппроксимации, в результате образуется целевая функция, которая сравнивается с тестовым (эталонным) множеством. При этом на каждом шаге обучения коэффициенты аппроксимации нейронов меняются, меняется и целевая функция, которая далее повторно сравнивается с измененной тестовой функцией.

На *рисунке 5* представлены зависимости среднеквадратического отклонения от шагов обучения ИНС для значений среднего давления 40 и 50 кПа.

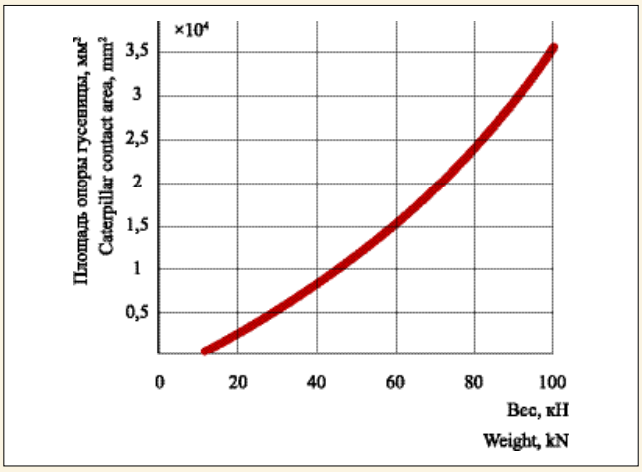


Рис. 4. Зависимость площади контактной поверхности гусеницы от эксплуатационного веса машины при значениях среднего давления на почву: 40-50 кПа
Fig. 4. Graphic dependence of contact surface area of tracks on the operating weight of the machine at average ground pressurel: 40-50 kPa

На графиках видно, что на втором шаге обучения отклонение между кривыми наименьшее. Это говорит о достоверности целевой функции и полученных в ходе расчета результатов. Ошибка в данном расчетном примере составила менее 5%, что находится в пределах инженерной погрешности.

При этом результат, выдаваемый ИНС, с каждым шагом обучения будет иным, потому что каждый шаг обучения изменяет коэффициенты аппроксимирующей функции. Важно понимать, что оптимальным значением шагов ИНС с точки зрения максимальной достоверности следует считать такое, при котором среднеквадратическое отклонение целевой функции с количеством нейронов 80-100 находится в пределах 2-10%, иначе зачастую возникает эффект «переобучения» нейронной сети [12].

Выводы. Разработана БД гусеничных сельскохозяйственных тракторов общего назначения (универсальных и универсально-пропашных) производства стран Европы/Северной Америки и РФ/СНГ в части параметров УВП: тяговый класс и эксплуатационный вес трактора, номинальная мощность двигателя, среднее давление на почву, площадь, длина и ширина контактной поверхности опорной ветви гусеницы. БД насчитывает около 100 машин. Определены основные графические и усредненные аналитические зависимости $q_{ср}$ ($G_э/N_e$) и $S_{овг}$ ($q_{ср}$), позволяющие вычислить параметры УВП ($q_{ср}$ и $S_{овг}$) машины по соотношению $G_э/N_e$ для аналогичных моделей отечественного и зарубежного производства.

Значение среднего давления на почву тракторов производства стран Европы/Северной Америки составляет около 40 кПа при меньших площадях контактных поверхностей, что в среднем на 10 кПа ниже, чем у тракторов производства РФ/СНГ. Разра-

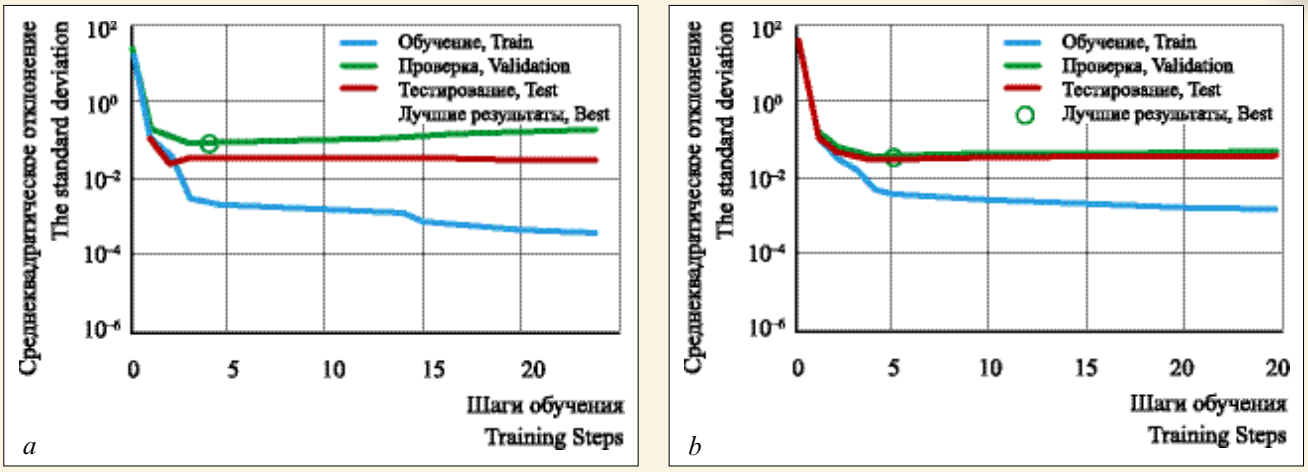


Рис. 5. Зависимость среднеквадратического отклонения от шага обучения при среднем давлении на почву: а – 40 кПа; b – 50 кПа

Fig. 5. Dependence of the standard deviation on the learning step at average ground pressure: a – 40 kPa; b – 50 kPa

ботан программный код искусственной нейронной сети (ИНС), проведены интегрирование в нее БД гусеничных сельскохозяйственных тракторов и тестирование ИНС и БД. Накопленная погрешность сведена к минимуму – до 5%, что говорит о достоверности полученных в ходе расчета ИНС результатов и надежности разработанного инструмента. Он позволяет осуществить анализ параметров ХС с учетом их УВП, конструктивных параметров тяговых и транспортных машин, а также предоставить рекомендации по выбору этих параметров для вновь создаваемых или модернизируемых машин.

Оперируя исходными данными из массива, заложенными в БД, ИНС определяет недостающие данные. При этом построение графических зависимостей проводят для имеющихся в БД интервалов значений отдельных параметров, затем аппроксимируют их до искомых значений. Пополнение БД путем добавления других гусеничных и колесных тяговых и транспортных машин, а также дополнительных параметров УВП (схемы расположения опорных катков, системы подрессоривания и др.) позволит уточнить выходные значения параметров и расширить спектр применения ИНС в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Русанов В.А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения. М.: ВИМ, 1998. 368 с.

2. Шарипов В.М. Конструирование и расчет тракторов. М.: Машиностроение, 2009. 752 с.

3. Ревенко В.Ю., Купрюнин Д.Г., Бейненсон В.Д., Федоткин Р.С., Белый И.Ф., Веселов Н.Б., Зверев Н.В. Оценка воздействий на почву трактора ВТ-150 с различными типами гусеничных движителей // Тракторы и сельхозмашины. 2014. N9. С. 30-33.

4. Купрюнин Д.Г., Щельцын Н.А., Бейненсон В.Д., Федоткин Р.С., Белый И.Ф., Ревенко В.Ю. Экспериментальное исследование сравнительных показателей гусеничных движителей сельскохозяйственных тракторов // Известия МГТУ, МАМИ. 2016. N3(29). С. 16-24.

5. Лапченко Е.А., Боброва Т.Н., Колпакова Л.А. Поисковая база данных «Тракторы» и ее использование в растениеводстве // Вестник НГАУ. 2013. N4(29). С. 113-116.

6. Альт В.В., Исакова С.П., Лапченко Е.А. Информационные системы поиска рациональных решений при формировании машинно-тракторного парка сельскохозяйственных предприятий // Аграрная наука – сельскохозяйственному производству Сибири, Монголии, Казахстана и Болгарии: Материалы международной научно-практической конференции (г. Красноярск, 25-28 июля 2011 г.). Красноярск: КГАУ, 2011. Ч. 2. С. 225-230.

7. Свидетельство № 2016620469 РФ. Шевцов В.Г., Лавров А.В., Годжаев З.А., Сизов О.А., Гурылев Г.С., Зубина В.А., Беликова Р.Р. Баланс питательных веществ в почвах и техническое обеспечение технологических процессов внесения удобрений в сельскохозяйственных организациях России за период 1990-2014 гг. // Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2016620782. 2016.

8. Измайлов А.Ю., Кряжков В.М., Антышев Н.М., Елизаров В.П., Келлер Н.Д., Лобачевский Я.П., Сорокин Н.Т., Гурылев Г.С., Савельев Г.С., Сизов О.А., Шевцов В.Г., Буклагин Д.С., Гольтяпин В.Я., Лачуга Ю.Ф. Концепция модернизации парка сельскохозяйственных тракторов России на период до 2020 года. М.: ВИМ, 2013. 84 с.

9. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов О.А. Перспективные пути применения энерго- и экологически эффективных машинных технологий и технических средств // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. N4. С. 8-11.

10. Что такое ИНС и зачем они нужны? // Учебник по нейронным сетям. URL: http://euralnnet.info/ (Дата обращения: 22.05.2017).

11. Тадеусевич Р., Боровик Б., Гончаж Т., Леппер Б. Элементарное введение в технологию нейронных сетей с примерами программ. М.: Горячая линия-Телеком, 2011. 410 с.

12. Rosenblatt F. Principles of Neurodinamics. Washington D.C.: Spartan Press. 1961: 245-248.

13. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая Линия-Телеком, 2007. 384 с.

14. Хайкин С. Нейронные сети: Полный курс. М.: Вильямс, 2016. 1104 с.

15. Mohamad H. Hassoun Fundamentals of Artificial Neural Networks. London: The MIT Press Cambridge, 1995: 501.

16. Лоренц В.А., Гавриков В.Л., Хлебопрос Р.Г. Влияние числа нейронов сети на ее обучение и точность прогноза // Вестник СибГАУ. 2013. N1 (47). С. 56-59.

REFERENCES

1. Rusanov V.A. Problema pereuplotneniya pochv dvizhitelyami i effektivnye puti ee resheniya [Problem of soil compaction by propellers and efficient ways to solve it]. Moscow: VIM, 1998: 368. (In Russian)

2. Sharipov V.M. Konstruirovanie i raschet traktorov [Design and calculation of tractors]. Moscow: Mashinostroenie, 2009: 752. (In Russian)

3. Revenko V.Yu., Kupryunin D.G., Beynenson V.D., Fedotkin R.S., Belyy I.F., Veselov N.B., Zverev N.V. Estimation of soil compaction by BT-150 tractor equipped with different types of caterpillars. *Traktory i sel'khozmashiny*. 2014; 9: 30-33. (In Russian)

4. Kupryunin D.G., Shchel'tsyn N.A., Beynenson V.D., Fedotkin R.S., Belyy I.F., Revenko V.Yu. Experimental study of comparative indicators tracked propulsion of agricultural tractors. *Izvestiya MGTU, MAMI*. 2016; 3(29): 16-24. (In Russian)

5. Lapchenko E.A., Bobrova T.N., Kolpakova L.A. Search Database «Tractors» and its use in crop production. *Vestnik NGAU*. 2013; 4(29): 113-116. (In Russian)

6. Al't V.V., Isakova S.P., Lapchenko E.A. Information rational decisions search system in the formation of machine and tractor fleet of agricultural enterprises. *Agrarnaya nauka – sel'skokhozyaystvennomu proizvodstvu Sibiri, Mongolii, Kazakhstana i Bolgarii:* Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Krasnoyarsk, 25-28 July 2011). Krasnoyarsk: KGAU, 2011. Ch. 2: 225-230. (In Russian)

7. Svidetel'stvo No 2016620469 RF. Shevtsov V.G., Lavrov A.V., Godzhaev Z.A., Sizov O.A., Gurylev G.S., Zubina V.A., Belikova R.R. Balans pitatel'nykh veshchestv v pochvakh i tekhnicheskoe obespechenie tekhnologicheskikh protsessov vneseniya udobreniy v sel'skokhozyaystvennykh organizatsiyakh Rossii za period 1990-2014 gg. [The balance of nutrients in the soil and logistics processes applying fertilizers in agricultural organizations of Russia for the period 1990-2014]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii bazy dannykh No 2016620782. 2016. (In Russian)

8. Izmaylov A.Yu., Kryazhkov V.M., Antyshev N.M., Elizarov V.P., Keller N.D., Lobachevskiy Ya.P., Sorokin N.T., Gurylev G.S., Savel'ev G.S., Sizov O.A., Shevtsov V.G., Buklagin D.S., Gol'tyapin V.Ya., Lachuga Yu.F. Kontseptsiya modernizatsii parka sel'skokhozyaystvennykh traktorov Rossii na period do 2020 goda [Concept of modernization of agricultural tractors fleet in Russia for the period until 2020]. Moscow: VIM, 2013: 84. (In Russian)

9. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P.. Sizov O.A. [Long-term ways of use of energy and environmentally efficient machine technologies and techniques. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2013; 4: 8-11. (In Russian)

10. Chto takoe INS i zachem oni nuzhny? [What mean artificial neural networks and why they are necessary? Neural networks textbook. URL: http://euralnnet.info/ (Accessed 22.05.2017). (In Russian)

11. Tadeusevich R., Borovik B., Gonchazh T., Lepper B. Elementarnoe vvedenie v tekhnologiyu neyronnykh setey s primerami programm [Elementary introduction to neural networks technology with examples of programs]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2011: 410. (In Russian)

12. Rosenblatt F. Principles of Neurodinamics. Washington D.C.: Spartan Press. 1961: 245-248. (In English)

13. Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L. Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow: Goryachaya Liniya-Telekom, 2007: 384. (In Russian)

14. Khaykin S. Neyronnye seti: Polnyy kurs [Neural Networks: A full course]. Moscow: Vil'yams, 2016: 1104. (In Russian)

15. Mohamad H. Hassoun Fundamentals of Artificial Neural Networks. London: The MIT Press Cambridge, 1995: 501. (In English)

16. Lorents V.A., Gavrikov V.L., Khlebopros R.G. Impact of number the of neurons in network on its training and prediction accuracy. *Vestnik SibGAU*. 2013; 1 (47): 56-59. (In Russian)

Критерии авторства. Все авторы несут ответственность за представленные в статье сведения и плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution. The authors are responsible for information and plagiarism avoiding.

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

УДК 631.316.4 DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-31-36

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЙ ПРОПАШНОЙ КУЛЬТИВАТОР

Руденко Н. Е.[1], докт. с.-х., наук, профессор; **Носов И.А.**[1]; **Кайванов С.Д.**[1]*, инженер; **Петухов Д.А.**[2], канд. техн. наук

[1]Ставропольский государственный аграрный университет, Зоотехнический пер., 12, г. Ставрополь, 355017, Российская Федерация, *e-mail: kajwanov@yandex.ru
[2]Новокубанский филиал «Росинформагротех» (КубНИИТиМ), ул. Красная, 15, г. Новокубанск, Краснодарский край, 352243, Российская Федерация

Пропашные культиваторы имеют ряд недостатков: конструкция усложнена за счет применения на каждой секции 4-звенной (параллелограммной) подвески рабочих органов; в качестве копирующего средства используют колеса, которые находятся на расстоянии от рабочих органов, в другой вертикальной плоскости, и негативно влияют на вариабельность глубины обработки; рабочие органы – стрельчатые лапы с углом крошения до 16 градусов. Показали, что в процессе работы части стойки и лапы, движущиеся в почве, поднимают ее и отбрасывают в стороны, создавая неровную поверхность: образуются бороздки, выносится влажная почва. Отметили, что процессы усугубляются при увеличении скорости рабочего движения культиватора. Предложили ресурсосберегающий пропашной культиватор с радиальной подвеской рабочих органов. В качестве грядиля использована плоская пластинчатая пружина. Это упрощает конструкцию, исключает горизонтальные колебания рабочих органов, обеспечивает постоянное прижатие их в процессе работы. Разработали рабочий орган в виде закрепленного на стойке плоского стрельчатого лемеха со спиралью. Ширина захвата лемеха – 420 мм, толщина – 4 (5) мм. Спираль диаметром 50 мм изготовлена из углеродистой пружинной проволоки диаметром 2-3 мм. На каждой секции установлена одна лапа, вместо трех-пяти, что существенно снижает материалоемкость. Лемех со спиралью образуют отбрасывающе-рыхлительный элемент, создающий мелкокомковатый верхний слой почвы. Отметили, что лемех выполняет копирующие функции, поэтому дополнительные копирующие колеса не требуются. Испытания показали, что новый рабочий орган культиватора позволяет качественно работать при скорости до 14-18 км/ч.

Ключевые слова: пропашной культиватор, междурядная обработка почвы, лемех, спиральный рабочий орган, грядиль, радиальная подвеска.

Для цитирования: Руденко Н.Е., Носов И.А., Кайванов С.Д., Петухов Д.А. Ресурсосберегающий пропашной культиватор // *Сельскохозяйственные машины и технологии.* 2017. N4. С. 31-36

RESOURCE-SAVING INTER-ROW CULTIVATOR

Rudenko N.E.[1], Dr. Sc. (Agr.); **Nosov I.A.**[1]; **Kayvanov S.D.**[1]*; **Petukhov D.A.**[2], Ph. D. (Eng.)

[1]Stavropol State Agrarian University, Zootekhnicheskiy per., 12, Stavropol, 355017, Russian Federation, *e-mail: kajwanov@yandex.ru.
[2]Novokubansk branch of «Rosinformagrotekh» (KubNIITiM), Krasnaya St., 15, Novokubansk, Krasnodar Krai, 352243, Russian Federation

Inter-row cultivators have some shortcomings: design is complicated due to placing on each section of a 4-unit (parallelogram) suspension of working tools; as the copying means use wheels which are mounted at distance from working tools, in other vertical plane, and have negative effect on variability of tillage depth; working tools are V-shaped hoes with a crumbling angle not more than 16 degrees. In the operation course the parts of a leg and a hoe, moving in the soil, raise it and throw to the side, creating not aligned surface grooves are formed, imposed moist soil. These processes are exacerbated by increasing the operating speed of the cultivator. The authors offered a resource-saving inter-row cultivator with a radial suspension of working tools. A flat plate spring was used as a beam. This simplifies the design, eliminates the horizontal oscillations of the working tools, provides a constant pressing them in the process. The working tool in the form of a flat lancet plowshares with a spiral fixed on the leg was designed. Operating width of a ploughshare is of 420 mm, thickness equals 4 (5) mm. The spiral with a diameter of 50 mm is made of a carbon spring wire with a diameter of 2-3 mm. One hoe is

set instead of three-five tines on each section, that significantly reduces material consumption. A plough share with a spiral form the swinging-loosening element that provides creating a fine lumpy topsoil. The ploughshare performs the copying functions therefore the additional copying wheels are not required. Tests showed that the new working tool of a cultivator allows to operate qualitatively at a speed up to 14-18 km/h.

Keywords: Inter-row cultivator; Inter-row soil tillage; Plough share; Spiral working tool; Beam; Radial suspension.

For citation: Rudenko N.E., Nosov I.A., Kayvanov S.D., Petukhov D.A. Resource-saving inter-row cultivator. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2017; 4: 31-36. DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-31-36. (In Russian)

Уход за посевами пропашных культур предусматривает 2-3 междурядные обработки культиватором [1]. Это исключает или в значительной степени сокращает применение гербицидов, особенно в случае получения экологически чистой продукции. Кроме того, гербициды оказывают негативное влияние на рост и развитие культурных растений. Почвенная корка, не разрушенная после осадков, снижает урожайность на 10%.

У нас в стране и за рубежом используют пропашные культиваторы различной конструкции.

Большинство из них имеет секции с 4-звенной параллелограммной подвеской рабочих органов [2]. У некоторых пропашных культиваторов (типа КРН) можно регулировать длину верхнего звена. Тем самым изменяют угол вхождения рабочего органа (лапы) в почву, увеличивая или уменьшая глубину его хода. Но из-за превращения параллелограммной формы подвески в трапецеидальную стабильность глубины обработки несколько снижается и бывает невыдержанной. Поэтому на зарубежных пропашных культиваторах верхнее звено подвески делают нерегулируемым для сохранения формы.

Параллелограмм обеспечивает параллельность перемещения рабочих органов в вертикальной плоскости. Однако в процессе эксплуатации растут зазоры в соединительных шарнирах 4-звенника. Это увеличивает горизонтальные колебания секции, что приводит к повреждению растений рабочими органами, расположенными сзади и имеющими наибольшую амплитуду колебаний.

Для регулировки глубины хода рабочих органов и копирования поверхности почвы предусмотрены обрезиненные колеса. Их перемещают в вертикальной плоскости с помощью рукоятки и секторного или винтового механизма.

Основной недостаток такой системы регулирования глубины хода рабочих органов – расположение копирующего колеса вдали от рабочих органов: колесо и рабочие органы перемещаются по разному микрорельефу.

При наезде колеса на комок почвы рабочие органы поднимаются, уменьшая глубину обработки; при попадании в углубление, выемку они заглубляются. Колесо является ведущим элементом, а рабочие органы ведомыми. Этим объясняется повышенная вариабельность глубины обработки почвы [3-5].

В процессе работы на колесо действует сопротивление почвы смятию. С увеличением скорости рабочего движения сопротивление растет, что приводит к подъему, «всплытию» колеса и, соответственно, к уменьшению глубины обработки. Этому способствуют и рабочие органы. Вот почему при работе на повышенных скоростях глубину обработки устанавливают на 20-30% больше заданной [6-9].

В качестве рабочих органов используют стрельчатые лапы, лапы-бритвы, боронки разных видов. На секции культиватора размещают одну стрельчатую и две лапы-бритвы или пять стрельчатых лап. Стрельчатая лапа имеет стойку и лемех с углом крошения α =12-18°. Ширина захвата варьирует от 150 до 320 мм.

При работе нижняя часть стойки и крылья стрельчатого лемеха выворачивают и поднимают на поверхность комки почвы, количество которых зависит от влажности и плотности почвы.

С увеличением скорости рабочего движения происходит «отбрасывание» почвы, ибо действию на почву нет противодействия (*рис. 1*).

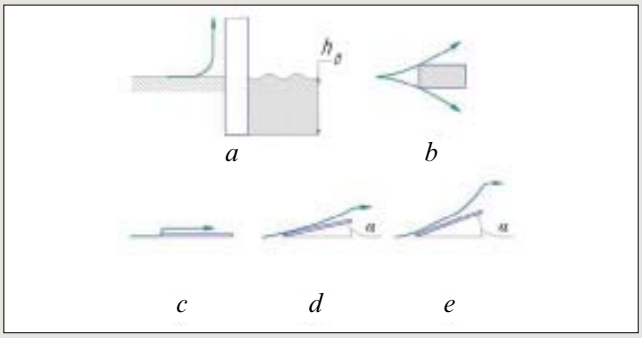


Рис. 1. Схема воздействия стойки и лемеха на почву:
a – по вертикали; b – по горизонтали; c-e –при увеличении угла крошения α лемеха
Fig. 1. Diagram of impact of a leg and share on soil:
a – vertically; b – horizontally; c-e – in case of crumbling angle α of share increase

Дальность отбрасывания почвы возрастает с увеличением скорости и угла крошения α. Создается неровная «гребнистая» поверхность, образуются бороздки за стойкой с оголенным дном ($h_б$), выносится влажная почва, увеличивающая площадь испарения. Исходя из этого угол крошения α

требуется минимальный, а стойка должна располагаться над поверхностью почвы [9, 10].

Чтобы исключить повреждение растений, их засыпание отбрасываемой почвой, на секциях размещают защитные щитки или диски.

Цель исследований – обоснование технологической схемы пропашного культиватора, типа и параметров инновационных технических решений, обеспечивающих эффективность его применения.

Материалы и методы. Проведен анализ технологических и технических решений с учетом выполнения агротехнических требований к междурядной обработке пропашных культур при ширине междурядий 0,7 м. Теоретические исследования проверяли в полевых испытаниях по рекомендованным методикам.

Результаты и обсуждение. Предложен ресурсосберегающий пропашной культиватор, в конструкции которого отсутствуют копирующие колеса, 4-звенная подвеска, механизм регулировки глубины обработки (*рис. 2*). На каждой секции нет большого количества рабочих органов. Исключено перемещение стоек рабочих органов в почве.

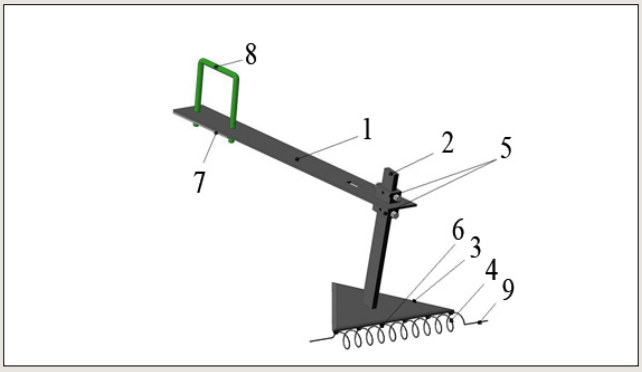


Рис. 2. 3D-модель секции пропашного культиватора:
1 – грядиль; 2 – стойка; 3 – треугольный лемех; 4 – спираль; 5 – держатели; 6 – зацеп; 7 – упорная пластина; 8 – скоба; 9 – пружинная струна
Fig. 2. 3D model of inter-row cultivator section
1 – beam; 2 – leg; 3 – V-shaped share; 4 – spiral; 5 – holds; 6 – hook; 7 - thrust plate; 8 – loop; 9 – stitch wire

Число секций $n_к$ на культиваторе увязано с параметрами сеялки:

$$n_к = n_с + 1,$$

где $n_с$ – число секций на сеялке (число засеваемых сеялкой рядков).

Например, при 8-рядном посеве $n_с = 8$:

$$n_к = 8 + 1 = 9,$$

то есть на культиваторе устанавливают девять секций.

Культиватор пропашной ресурсосберегающий содержит брус с секциями. Каждая секция включает грядиль, на котором установлен рабочий орган, состоящий из стойки, треугольного лемеха, спирали, держателей, упорной пластины, скобы, пружинной струны.

Жесткая стойка сечением 16×45 мм крепится к грядилю с помощью держателей, лемех выполнен в виде пластинчатого треугольника толщиной 4-5 мм из стали *65Г* с углом крошения $\alpha = 0°$.

Проволоку спирали нанизывают на несколько зацепов, расположенных вертикально вдоль заднего обреза лемеха, помещая ее в направляющие отверстия. Проволока марки *Б*, класса 3, диаметром 3 мм. Пружинную проволоку изготавливают из сталей марок *КТ-2* или *3К-7*. Они отличаются высоким содержанием углерода, марганца и кремния.

Диаметр цилиндрической части спирали составляет 50 мм, что позволяет обрабатывать почву на глубине 40-50 мм. Концевые части спирали выполнены в виде горизонтальной струны длиной 100 мм.

Длину конусной части спирали $b_к$ определяют по следующей зависимости:

$$b_к = (b_М - b_л - 2b_з)/2,$$

где $b_М$ – ширина междурядий, мм;

$b_л$ – ширина захвата лемеха, мм;

$b_з$ – ширина защитной зоны, мм.

С учетом максимальной величины защитной зоны $b_{зmax}$= 140 мм, ширина захвата лемеха:

$b_л = b_М - 2\, b_{зmax} = 700 - 2 \cdot 140 = 420$ мм.

Для обеспечения минимальной защитной зоны при $b_{зmax}$= 60 мм длина конусной части спирали должна быть:

$$b_к = \frac{700 - 420 - 2 \cdot 60}{2} = 80 \text{ мм}.$$

Шаг цилиндрической части спирали определяют по формуле:

$$S = \pi D\, tg\beta$$

где β – угол наклона винтовой линии спирали, град.

Чтобы проволока активно воздействовала на комки почвы, угол наклона винтовой линии β должен быть меньше угла трения почвы по стальной поверхности φ : $\beta < \varphi$.

При φ = 18-20° берем для расчетов β = 14-15°.

Тогда шаг спирали равен:

$S = 3{,}14 \cdot 50 \cdot tg14°(15°) = 39942$ мм.

Примем S=40 мм.

Проверим, обеспечивает ли данный шаг спирали получение комков почвы диаметром $d_к$<25 мм (в соответствии с агротребованиями). При шаге S = 40 мм в спираль проходят комки почвы такого же размера d = 40 мм. Проволока задней части спирали раскалывает комок. Образуется комочек диаметром $d_к$:

$$d_к = \frac{d}{2}\Delta; \quad \Delta = d\,tg\delta,$$

где δ – угол скалывания почвы.

При δ=5-7°: $d_к = \frac{40}{2} + 40tg7^\circ = 24{,}9$ *мм*,

что отвечает агротребованиям. Следовательно, подтверждается правильность выбора величины шага спирали S = 40 мм.

Грядиль выполнен из стали *65Г* в виде плоской пластинчатой пружины сечением 100×6 мм или 80×8 мм.

Рабочую длину грядиля определяют по формуле:

$$lp = \sqrt{\frac{3Et_г\Delta}{2\sigma_и}},$$

где $E = 2{,}12 \cdot 10^{11}$ модуль упругости, Па;

$[\sigma_u]=4 \cdot 10^8$ – допустимое напряжение, Па;

Δ – возможное отклонение лапы вверх, м.

С учетом копирования микрорельефа поверхности почвы принимаем Δ =0,1 м.

Тогда:

$$Lp = \sqrt{\frac{3 \cdot 2{,}12 \cdot 10^{11} \cdot 0{,}006 \cdot 0{,}1}{2 \cdot 4 \cdot 10^8}} = 0{,}69 м.$$

Грядиль крепят к нижней стороне бруса культиватора с помощью скобы. При использовании бруса 140×140 мм общая длина грядиля равна:

$l_г = b_б + l_c + l_p + b_c + b_k$,

где $b_б$ – ширина бруса, м;

l_c – длина грядиля под скобу, м;

b_c – ширина паза под стойку лапы, м;

b_k – длина концевой части, м.

Получим: $l_г$= 0,14 + 0,04 + 0,69 + 0,06 + 0,07 = 1,0 м.

Возникающее напряжение в месте крепления пружинного грядиля к брусу культиватора определяют по формуле [9]:

$$\sigma_{max} = \frac{6M_{max}}{b_г t_г^2} = \frac{6F_г l_г}{b_г t_г^2},$$

где M_{max} – момент кручения;

$F_Г$ – усилие прижатия спирали, Н [7].

$$\sigma_{max} = \frac{6 \cdot 209 \cdot 0{,}69}{0{,}1 \cdot 0{,}006^2} = 240{,}3\ МПа,$$ то есть $\sigma_{max} < [\sigma_н]$,

что подтверждает надежность грядиля.

Держатели и паз в грядиле выполнены таким образом, что стойка лапы устанавливается с наклоном вперед под углом 7° к вертикальной плоскости (*рис. 3*). Более простая по конструкции радиальная подвеска возможна потому, что рабочий орган в виде спирали имеет цилиндрическую форму и окружность в сечении. Подъем и опускание спирали не изменяют угол ее вхождения в почву.

Технологический процесс работы культиватора осуществляется следующим образом. В начале работы при опускании культиватора почва воздействует на спираль, обеспечивая заглубление ее, пока реакция почвы не станет равной реакции плоского пружинного грядиля.

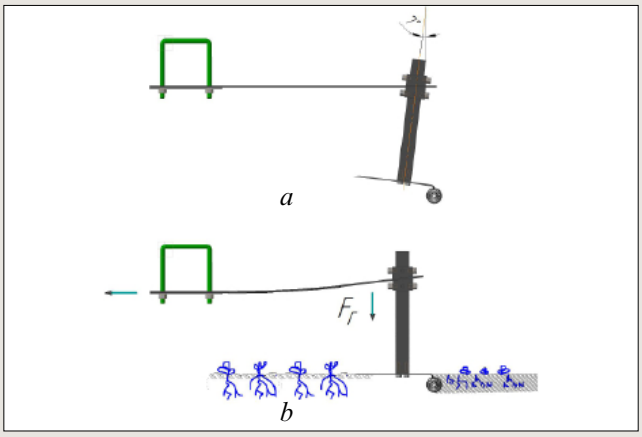


Рис. 3. Вид секции культиватора сбоку:
a – до работы; b – в процессе работы
Fig. 3. Cultivator section side view:
a – before the operation; b – during the operation

Лемех выполняет функцию ограничителя глубины и копирования, тем самым обеспечивая совмещение копирующих и рабочих функций в одной со спиралью вертикальной плоскости, что стабилизирует глубину обработки.

Лемех часть сорняков подрезает, часть прижимает к поверхности почвы, облегчая процесс разрыва их и вычесывание спиралью. Спираль, помимо вычесывания сорняков, рыхлит почву. При этом вместо деформации сжатия использована деформация растяжения, что существенно менее энергоемко. Комбинация «спираль – лемех» создает от-

Table 1 Таблица 1

Условия проведения испытания
Tests conditions

Показатели Indicators	Значение Value
Вид работы Type of work	Культивация Cultivation
Тип почвы и название по механическому составу Soil type and name in texture	Предкавказский слабовыщелоченный среднесуглинистый чернозем Caucasian weakly leached medium loam humus
Рельеф Relief	Ровный Smooth
Микрорельеф Microrelief	Ровный Smooth
Влажность (%) / плотность (т/м^3) почвы в слоях, мм: Soil moisture (%) / density (t/m^3) in layers, mm: 0-50 мм 51-100 мм 101-150 мм	 21,6 и 0,84 27,1 и 1,02 28,2 и 1,43
Количество сорняков, шт./м^2 Number of weeds, pcs/m^2	22

ражающе-рыхлительный элемент, исключающий отбрасывание почвы даже при повышении скорости рабочего движения.

Совместно с КубНИИТиМ в июне 2016 г. проведены полевые испытания рабочих органов в ходе междурядной обработки сорго сорта Самба (*таблица 1*).

Рис. 4. Установка спиральной лапы на секции пропашного культиватора КРН-5,6
Fig. 4. Spiral mounting on the inter-row cultivator KRN-5.6 section

Рис. 5. Вид поверхности почвы после прохода спиральной лапы
Fig. 5. Soil surface after spiral pass

Как видно из *рисунка 4*, копирующее колесо секции пропашного культиватора КРН–5,6 не касается поверхности почвы. Копирование осуществляется стрельчатым лемехом, а обработка почвы – спиралью, что обеспечивает качественный результат (*рис. 5*).

По всем качественным показателям спиральная лапа превосходит стандартную стрельчатую (*табл. 2*).

Выводы

Использование радиальной подвески в виде плоского пружинного грядиля в секции пропашного культиватора вместо 4-звенной существенно уменьшает материалоемкость. На каждой секции устанавливают вместо трех-пяти лап одну – спиральную, что снижает затраты на размещение их и регулировку.

С ростом растений боковые лапы культиваторов обычно снимают, что уменьшает обрабатываемую площадь и требует дополнительных затрат труда. Спиральной лапой можно проводить первую, вторую и третью междурядную обработки без дополнительных регулировок.

Отражающе-рыхлительная комбинация лемеха и спирали и расположение стойки над поверхностью почвы обеспечивают качественную работу культиватора на скорости 14-18 км/ч, что существенно повышает его производительность.

Table 2 Таблица 2

Качественные показатели работы
Operating qualitative characteristics

Показатели Characteristics	Стандартная стрельчатая лапа (α = 16°) Standard lancet, α=16°		Спиральная лапа Spiral	
Рабочая скорость движения, км/ч Operating speed, km/h	14	18	14	18
Коэффициент вариации глубины обработки почвы, % Coefficient of variation of depth of soil tillage, %	13,3	25,0	8,6	11,0
Массовая доля (%) комков по фракциям, мм: Mass share (%) of lumps fractions, mm: <10 10-15 15-20 20-25 >25	 19,4 4,8 5,8 5,3 64,7	 18,9 3,3 1,8 3,3 72,7	 73,2 11,1 9,5 4,0 2,2	 72,2 10,4 7,9 5,3 4,0
Степень выноса влажной почвы на поверхность, % Degree of removal of the wet soil surface, %	12,9	10,8	3,4	5,0
Гребнистость поверхности почвы, мм Soil surface ridgeness, mm	70,0	52,0	29,0	23,0
Степень крошения почвы (< 25 мм), % Degree of soil crumbling (< 25 mm), %	30-35		>95 / more 95	

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руденко Н.Е., Кулаев Е.В, Руденко В.Н. Механизация растениеводства: монография. Ставрополь: АГРУС, 2014. 236 с.

2. Горбачев С.П., Руденко Н.Е. Новая технология заделки семян // Тракторы и сельхозмашины. 2012. N12. С. 16-17.

3. Spokas K., Forcella F., Archer D., Reicosky D. SeedChaser: Vertical soil tillage distribution model. Computers and Electronics in Agriculture. 2007; 57: 62-73.

4. Ibrahmi A., Bentaher H., Hbaieb M., Maalej A., Mouazen A.M. Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation. Computers and Electronics in Agriculture. 2015; 117: 258-267.

5. Shmulevich I., Asaf Z. Rubinstein D. Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method. Soil & Tillage Research. 2007; 97: 37-50.

6. Мазитов Н.К., Лобачевский Я.П., Шарафиев Л.З., Рахимов И.Р. Универсальная технология обработки почвы // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. N4. С. 25-29.

7. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П., Сизов О.А. Перспективные пути применения энерго- и экологически эффективных машинных технологий и технических средств // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. N4. С. 8-12.

8. Рекомендации по машинному обеспечению технологий возделывания и уборки основных сельскохозяйственных культур. Новокубанск: КубНИИТиМ, 2015. 104 с.

9. Руденко Н.Е., Кайванов С.Д., Завялик Ф.Н. Скоростной энергосберегающий культиватор // Тракторы и сельхозмашины. 2016. N7. С. 18-21.

10. Панов И.М. Выбор энергосберегающих способов обработки почвы // Тракторы и сельхозмашины. 1990. N8. С. 32-35.

REFERENCES

1. Rudenko N.E., Kulaev E.V, Rudenko V.N. Mekhanizatsiya rastenievodstva [Crop production mechanization]: monografiya. Stavropol': AGRUS, 2014: 236. (In Russian)

2. Gorbachev S.P., Rudenko N.E. New technology of seeding. *Traktory i sel'khozmashiny*. 2012; 12.: 16-17. (In Russian)

3. Spokas K., Forcella F., Archer D., Reicosky D. SeedChaser: Vertical soil tillage distribution model. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2007; 57: 62-73. (In English)

4. Ibrahmi A., Bentaher H., Hbaieb M., Maalej A., Mouazen A.M. Study the effect of tool geometry and operational conditions on mouldboard plough forces and energy requirement: Part 1. Finite element simulation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2015; 117: 258-267. (In English)

5. Shmulevich I., Asaf Z. Rubinstein D. Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method. *Soil & Tillage Research*. 2007; 97: 37-50. (In English)

6. Mazitov N.K., Lobachevskiy Ya.P., Sharafiev L.Z., Rakhimov I.R. Universal technology of soil tillage. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2014; 4L 25-29. (In Russian)

7. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Sizov O.A. Long-term ways of use of energy and environmentally efficient machine technologies and techniques. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2013; 4: 8-12. (In Russian)

8. Rekomendatsii po mashinnomu obespecheniyu tekhnologiy vozdelyvaniya i uborki osnovnykh sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Recommendations about machine ensuring technologies of cultivation and harvesting of the main crops]. Novokubansk: KubNIITiM, 2015. 104 s. (In Russian)

9. Rudenko N.E., Kayvanov S.D., Zavyalik F.N. High-speed energy-saving cultivator. *Traktory i sel'khozmashiny*. 2016; 7: 18-21. (In Russian)

10. Panov I.M. Choice of energy-saving ways of soil cultivation. *Traktory i sel'khozmashiny*. 1990; 8: 32-35. (In Russian)

Критерии авторства. Все авторы несут ответственность за представленные в статье сведения и плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution. The authors are responsible for information and plagiarism avoiding.

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

УДК 631.362.322 DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-37-42

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСКУССТВЕННОЙ ПОЧВЕННОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНАШИВАНИЯ ЛЕЗВИЯ

Лискин И.В.; **Миронов Д.А.*;** **Курбанов Р.К.,** канд. техн. наук

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, 1-й Институтский проезд, 5, Москва, 109428, Российская Федерация; *e-mail: mironov-denis87@mail.ru

При обработке почвы режущими деталями сельхозмашин можно выделить три основных типа стружки: сдвиг, отрыв и сливная стружка. Сдвиг наиболее четко выражен на песчаных почвах, отрыв – на глинистых и суглинистых, сливная стружка – на почвах повышенной влажности с высоким содержанием глинистых частиц. В полевых условиях исследовать закономерности изнашивания почворежущих лезвий сложно из-за неоднородности физико-механических свойств почвы и изменяющихся климатических условий. При лабораторном моделировании почвенных условий можно проводить эксперименты вне зависимости от погоды и времени года. Для разработки искусственной почвы и моделирования износа лезвий рассмотрели условия построения модели исходя из механики абразивного изнашивания. Выделили основные факторы, определяющие характер и интенсивность изнашивания почворежущего лезвия. Отметили, что изнашивающая способность абразивных частиц определяется радиусом закругления их острых выступов, зависящего от размера частицы. Показали, что твердость почвы влияет на износ режущих деталей и характеризует проникновение в нее режущих элементов, а степень закрепленности абразивных частиц определяет тип стружки. Представили почву как абразивную среду с частицами, находящимися в состоянии нежесткого закрепления и имеющими возможность перемещаться относительно друг друга или поворачиваться вокруг своей оси под действием нормальных и касательных напряжений. Подтвердили положение о зависимости типа стружки при разрушении почвенного пласта от соотношения нормальных и касательных напряжений, характеризующих степень закрепленности твердых частиц. Провели исследования физико-механических свойств искусственной почвы на основе кварцевого песка и парафина. Для изменения ее свойств в состав искусственной почвы вводили вазелин, уменьшающий твердость и степень закрепленности твердых частиц, или церезин, увеличивающий эти показатели. Механический состав изменяли введением пылевидного цемента и заменой фракций абразивных частиц. Изготовили блоки искусственной почвы, расплавляя парафин при температуре 85-90 градусов Цельсия и засыпая в него твердую фазу. Провели исследования, позволившие выбрать варианты искусственной почвы для изучения основных закономерностей изнашивания почворежущих элементов.

Ключевые слова: обработка почвы, режущие детали, изнашивание почворежущих лезвий, искусственная почва, парафин, вазелин, церезин, абразив, пылевидный цемент.

Для цитирования: Лискин И.В., Миронов Д.А., Курбанов Р.К. Обоснование параметров искусственной почвенной среды для лабораторного исследования изнашивания лезвия // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N4. С. 37-42.

JUSTIFICATION OF PARAMETERS ARTIFICIAL SOIL FOR LABORATORY RESEARCH OF CUTTING EDGE WEAR

Liskin I.V.; **Mironov D.A.*;** **Kurbanov R.K.,** Ph. D. (Eng.)

Federal Scientific Agricultural Engineering Center VIM, 1st Institutskiy proezd, 5, Moscow, 109428, Russian Federation, *e-mail: mironov-denis87@mail.ru

For soil cultivation with the cutting tools of agricultural machines we can allocate three main types of shavings: shift, separation and continuous chip. The shift is most accurately expressed on sandy soils, a separation – on clay and loamy, continuous chip – on humid soils with the high content of clay particles. In field conditions researches of regularities of cutting edges wear are complicated because of heterogeneity of physic and mechanical properties of the soil and the changing climatic conditions. At laboratory modeling of soil conditions we can make experiments independent of weather and season. For development of the artificial soil and depend modeling of edges wear we considered conditions of creation

of model with use mechanics of abrasive wear. Have allocated The major factors defining character and intensity of wear were allocated. The wearing-out ability of abrasive particles is defined by the radius of the curve of their sharp ledges. This radius depends on the particle size. The hardness of the soil influences wear of the cutting details and characterizes penetration into it of the cutting elements, and degree of fixedness of abrasive particles defines shaving type. We conseeder the soil as the abrasive environment with the particles which are in a condition of non-rigid fixing and have an opportunity to move relatively each other or to turn on itself under the influence of normal and tangential stress. Type of shaving when soil layer destruction depends on a ratio of the normal and tangential stress characterizing degree of fixedness of firm particles. We conducted researches of physic and mechanical properties of the artificial soil on the basis of quartz sand and paraffin. Injection of the petrolatum into structure of the artificial soil reduces the hardness and degree of fixedness of firm particles, but the ceresin increases these indicators. The mechanical structure was changed due to introduction of dust-like cement and replacement of fractions of abrasive particles. We manufactured blocks of the artificial soil, melting paraffin at a temperature of 85-90 degrees Celsius and filling up in it a firm phase. Researches make it possible to choose options of the artificial soil for studying of the main regularities of soil cutting elements.

Keywords: Soil cultivation; Cutting elements; Soil cutting edges wear; Artificial soil; Paraffin; Petrolatum; Ceresin; Abrasive; Dust-like cement.

For citation: Liskin I.V. , Mironov D.A., Kurbanov R.K. Justification of parameters artificial soil for laboratory research of cutting edge wear. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2017; 4: 37-42. DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-37-42. (In Russian)

В России более 80% пахотных земель представлены глинистыми и суглинистыми почвами. Это говорит о том, что в подавляющем большинстве случаев при работе почвообрабатывающих машин наблюдаются процессы взаимодействия режущих элементов с почвенными частицами, характерные для обработки указанных типов почв. То есть разрушение почв плужными лемехами, культиваторными лапами и другими лезвийными рабочими органами происходит путем отрыва [1-4].

В процессе обработки почвы плужными лемехами, культиваторными лапами и другими режущими деталями сельскохозяйственных машин различают три основных вида разрушения почвы или типа стружки: стружку сдвига, отрыва и сливную. В некоторых случаях происходит сгруживание почвенных частиц перед лезвием. Стружка сдвига характерна для песчаных и супесчаных почв, отрыва – для большинства глинистых и суглинистых, сливная – для почв повышенной влажности с высоким содержанием глинистых частиц [5-6]

Сдвиг наиболее четко выражен на песчаных почвах повышенной влажности (более 15%). С понижением влажности до 5-7% стружка сдвига переходит в сгруживание, то есть перед лезвием образуется почвенный вал с непрерывно меняющимися частицами.

Цель исследования – разработка искусственной почвы для моделирования износа лезвий рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Материалы и методы. В полевых условиях исследование закономерностей изнашивания почворежущих лезвий представляет определенные сложности, связанные с изначальной неоднородностью ее физико-механических свойств и с изменяющимися климатическими условиями. Лабораторное моделирование почвенных условий позволяет проводить эксперименты независимо от погоды и времени года [7].

В большинстве лабораторных установок для воспроизведения свойств натуральных почв в качестве абразивной среды используют кварцевые или корундовые частицы, либо песчано-глинистые смеси с добавлением гравия, щебня и других компонентов. Установки чаще всего представляют собой круговые стенды, где испытываемые образцы движутся в увлажненной и уплотненной почвенной массе, засыпанной в кольцевой канал [6].

Один из основных недостатков установок подобного типа – отсутствие структуры абразивной среды из-за многократного взаимодействия образца с почвенными частицами, вследствие чего невозможно моделировать разрушение почвы отрывом – наиболее распространенный тип стружки в реальных условиях. Указанные выше типы разрушения почвы происходят при углах установки лезвия ко дну борозды 20-40°, характерных для большинства почвообрабатывающих машин.

Для моделирования отрыва при резании почвы необходимо обеспечить воспроизведение ее реальной структуры, например перед вспашкой. Этого можно достичь послойным срезанием подготовленной к испытаниям абразивной почвенной массы.

Увлажненная глина имеет свойство налипать на поверхность металла и образовывать комки при снижении влажности от испарения влаги, что искажает результаты эксперимента и увеличивает ошибки в опытных данных [8].

Для разработки искусственной почвы (ИП) и моделирования износа лезвий были рассмотрены условия построения модели с учетом механики абразивного изнашивания. Выделены основные факто-

ры, отражающие многообразие физико-механических свойств почвы и определяющие характер и интенсивность изнашивания почворежущего лезвия. К ним в первую очередь относятся механический состав почвы, ее твердость и связность (степень закрепленности частиц, определяющая характер разрушения пласта в процессе обработки).

Интенсивность изнашивания лезвия увеличивается с ростом содержания в почве твердых частиц (в основном кварцевых) размером 0,01-1,00 мм. Необходимо отметить, что изнашивающая способность частицы определяется радиусом закругления ее острых выступов, которые, внедряясь в поверхность металла, оставляют на нем след в виде пластически выдавленной канавки или микросреза. Радиус закругления острых выступов зависит от размера частицы: чем больше средний диаметр частицы, тем ниже острота граней.

Твердость почвы *H* характеризует сопротивление проникновению в нее режущих деталей сельхозмашин. Она влияет на давление частиц на поверхность металла. Соответственно, меняется интенсивность изнашивания лезвия.

Износ режущих деталей зависит также от степени закрепленности абразивных частиц в почве. Почва представляет собой среду, в которой частицы находятся в состоянии нежесткого закрепления и могут перемещаться (сдвигаться) относительно друг друга или поворачиваться вокруг своей оси под действием нормальных и касательных напряжений от внешних воздействий. Степень закрепленности абразивных частиц характеризуется максимальными касательными напряжениями и определяется пределом прочности на сдвиг τ [9].

Вид разрушения почвенного пласта непосредственно зависит от напряженного состояния почвы, а конкретно, от соотношения нормальных σ и касательных τ напряжений, характеризующих свойства почвы. Так, при отношении τ/σ, равном 0,5-4,0, наблюдается стружка отрыва, при значениях больше 4,0 – сдвиг, меньших 0,5 – слив [10, 11].

Реологические свойства, подобные почвенным образцам, содержащим в качестве пластичного связующего частицы глины, могут быть получены при замене в составе почвы глины с водой на технический парафин [12]. Применение парафина в качестве связующего абразивных частиц позволяет получить модель почвы, обладающую стабильными свойствами в течение длительного времени. Отмечено, что при резании клином в условиях температуры окружающей среды 18-22°С смесь парафина с абразивом разрушается путем отрыва подобно суглинистым почвам [13].

Для оценки пригодности ИП на основе кварцевого песка и парафина проведены исследования ее физико-механических свойств. Они включали определение параметров *H*, τ и σ. Учитывая многообразие факторов, влияющих на свойства реальных почв, в состав ИП ввели добавки с различным содержанием следующих компонентов: для изменения параметров *H*, τ и σ в основной состав ИП (парафин + кварцевые частицы) вводили технический вазелин, снижающий величину указанных параметров, или церезин, увеличивающий их.

Механический состав ИП изменяли введением пылевидного цемента и заменой размеров кварцевых частиц среднего диаметра. Для моделирования песчаных и супесчаных почв пониженной влажности готовили блоки ИП, аналогичные цементному раствору с отношением объема песка к объему цемента 20:1.

Изготовление одного блока ИП заключалось в расплавлении парафина при температуре 85-90° и засыпке в него твердой фазы (песок, цемент). Когда смесь застывала до комнатной температуры, абразивный блок был готов к использованию. Чтобы изменить размеры абразивных частиц, их просеивали через сито с заданным диапазоном ячеек.

Способ определения твердости ИП отличался от измерения в полевых условиях из-за значительно меньшей глубины резания в лабораторных экспериментах (1-5 мм), поскольку задачей исследований было изучение процесса изнашивания не всего образца в целом, а непосредственно его режущей части. На наш взгляд, для измерения твердости наиболее приемлем метод Бринелля, основанный на вдавливании сферического индентора под нагрузкой в исследуемый материал.

Твердость ИП определяли с помощью специально сконструированного прибора (*рис. 1*). Значение *H* вычисляли по формуле [14]:

$$H = \frac{P}{\frac{\pi D}{2}\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)},$$

где *P* – рабочая нагрузка;

D – диаметр шарового индентора;

d – диаметр отпечатка.

Непосредственное измерение диаметра отпечатка вызывает сложности, связанные с относительно большой шероховатостью абразивного материала, поэтому *d* удобнее выражать через глубину внедрения индентора *h*, величина которой вычисляется с погрешностью 0,01 мм (погрешность индикатора). Из *рисунка 2* следует:

$$d = AC = 2\sqrt{(AB)^2 - (OB)^2} = 2\sqrt{r^2 - (r-h)^2}$$

где *r* – радиус индентора (шарика).

Тогда:

$$H = \frac{2P}{\pi D\left(D - \sqrt{D^2 - 2\sqrt{r^2 - (r-h)^2}}\right)}.$$

Пределы прочности при растяжении τ и сдвиге σ определяли путем статического нагружения ме-

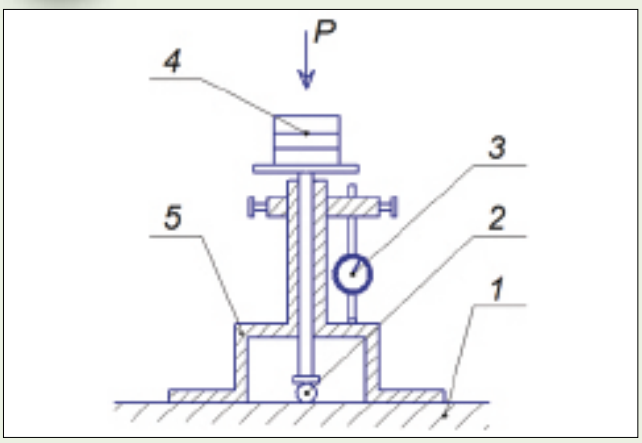


Рис.1. Прибор для измерения твердости искусственной почвы: 1 – искусственная почва; 2 – шаровой индентор; 3 – индикатор глубины; 4 – грузы; 5 – основание твердомера
Fig. 1. Device for measurement of artificial soil hardness: 1 – artificial soil; 2 – spherical indentor; 3 – depth indicator; 4 – load blocks; 5 – hardness meter basis

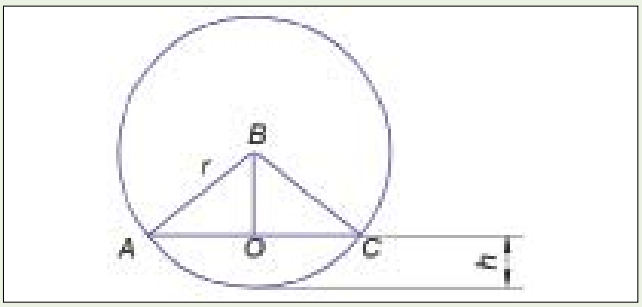


Рис. 2. Схема для определения диаметра отпечатка при измерениях твердости
Fig. 2. Scheme for determination of a dent diameter at measurements of hardness

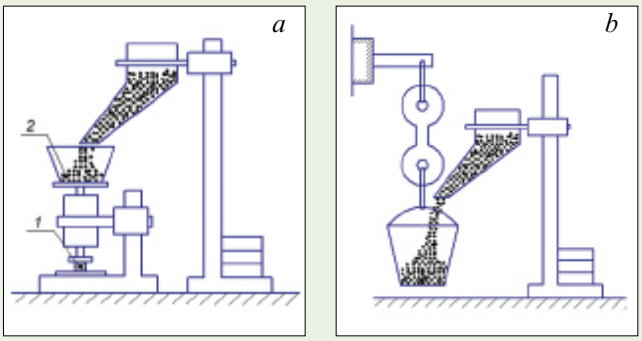


Рис. 3. Схема нагружения для определения пределов прочности образцов ИП: a – при сдвиге; b – при растяжении: 1 – образец; 2 – дробь
Fig. 3. Scheme of loading for definition of stress limit of artificial soil: a – at shift; b – at pulling: 1 – sample; 2 – shot

таллической дробью [14]. Схемы нагружения показаны на *рисунке 3*.

Сечение образцов при испытаниях на растяжение в месте разрушения представляло собой прямоугольник. При испытаниях на сжатие за момент разрушения образца принималось резкое скачкообразное увеличение деформации цилиндрического образца. Каждое значение τ и σ вычисляли по формулам:

$\tau = P_\tau/F$;

$\sigma = P_\sigma/F$;

где P_τ и P_σ – средняя величина приложенной нагрузки, при которой произошло разрушение образца;

F – площадь сечения образца в месте разрушения.

Результаты и обсуждение. На *рисунке 4* представлены зависимости твердости почвы H (кривая *1*) предела прочности при растяжении, τ (*кривая 2*) и σ (*кривая 3*) от процентного по массе содержания вазелина (сплошные линии) и церезина (штриховые линии).

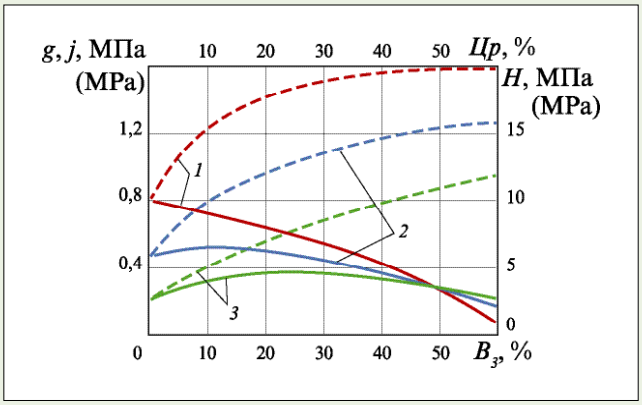


Рис. 4. Влияние процентного (по массе к парафину) содержания вазелина (сплошные линии) и церезина (штрихованные линии): 1 – на твердость; 2 – напределы прочности при сдвиге; 3 – при растяжении
Fig. 4. Influence percentage (on weight to paraffin) the content of vaseline (continuous lines) and ceresin (shaded lines): 1 – on hardness; 2 – on stress limits at shift; 3 – at pulling

Как видно, с увеличением содержания вазелина в парафине значения τ и σ вначале (до 15-20%) растут, затем падают, величина H непрерывно снижается. При увеличении содержания вазелина от 20 до 60%величина σ уменьшается в 1,7 раза, τ – в 2,6 раза, H – в 5,1 раза. Повышение концентрации церезина способствует росту значений τ, σ и H. Увеличение содержания церезина от 0 до 60% вызывает рост σ в 6,0 раза, τ – в 2,7 раза и H – в 1,9 раза. Отсюда следует, что применение в качестве присадок к парафину до 60% вазелина и 50% церезина позволяет расширить диапазон изменения пределов прочности на растяжение от 0,16 до 0,91 МПа, на сдвиг – от 0,21 до 1,27 МПа, твердости абразивной среды – от 1,6 до 20 МПа.

На *рисунке 5* приведены зависимости τ, σ и H от процентного (по объему) содержания цемента в кварцевом песке ρ и от среднего размера абразивных частиц D. Результаты экспериментов показали, что величины τ и σ возрастают с увеличением

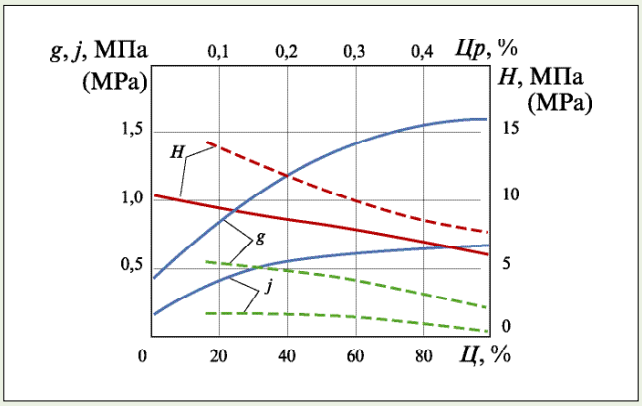


Рис. 5. Влияние процентного (по объему к песку) содержания цемента (сплошные линии) и размера кварцевых частиц (штриховые линии): a – на твердость; b – на пределы прочности при сдвиге; c – при растяжении

Fig. 5. Influence percentage (on volume to sand) the content of cement (continuous lines) and the size of quartz particles (shaped lines): a – on hardness; b – stress limits at shift; c – at pulling

содержания цемента, при этом H снижается. Наибольшие значения τ и σ принимают при наличии цемента около 100% и составляют, соответственно, 1,65 и 0,66 МПа. Твердость в этом случае равна 6,2 МПа, то есть снижается в 1,7 раза.

Непосредственное влияние на прочность и твердость оказывает размер абразивных частиц. С увеличением D показатели τ, σ и H снижаются и в интервале D от 0,1 до 0,5 мм падают, соответственно, от 0,20 до 0,03, от 0,52 до 0,20 и от 13,50 до 7,50 МПа.

Анализируя результаты исследований, можно сделать вывод, что прочность сцепления абразивных частиц определяется наличием наиболее малых фракций твердой фазы ИП. Это подтверждается результатами проведенных нами полевых испытаний и данными опубликованных работ, где показано, что наибольшие тяговые сопротивления почвообрабатывающих агрегатов возникают при обработке тяжелосуглинистых и глинистых почв, содержащих большое количество пылевидных частиц размером менее 0,01 мм [15].

Таким образом, в результате проведенных исследований определены основные свойства искусственной почвенной среды, влияющие на характер и интенсивность изнашивания лезвий. На основании исследований была выбрана ИП с набором физико-механических свойств, позволяющих изучать основные закономерности изнашивания почворежущих элементов. Разработанная ИП характеризуется стабильностью свойств и возможностью их изменения в зависимости от поставленных задач исследований.

Выводы

1. В полевых условиях исследование изнашивания почворежущих деталей представляет сложности из-за непостоянства свойств почвы и изменяющихся климатических показателей.
2. Лабораторное моделирование почвенных условий позволяет проводить эксперименты независимо от погоды.
3. Моделирование стружки отрыва возможно при послойном срезании абразивной почвенной массы.
4. Выделены основные факторы, определяющие характер и интенсивность изнашивания почворежущего лезвия.
5. Замена увлажненной глины в качестве связующего абразивных частиц на технический парафин позволяет получить модель почвы, обладающую стабильными свойствами в течение длительного времени.
6. При резании клином в условиях температуры окружающей среды 18-22°С смесь парафина с абразивом разрушается путем отрыва, подобно суглинистым почвам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лобачевский Я.П. Прочностные и деформационные свойства связных задерненных почв // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. N3. С. 18-20.

2. Измайлов А.Ю., Сидоров С.А., Лобачевский Я.П., Хорошенков В.К., Кузнецов П.А., Юрков М.А., Голосиенко С.А. Научные принципы повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающей техники // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2012. N3. С. 5-7.

3. Лобачевский Я.П., Сидоров С.А., Хорошенков В.К., Лужнова С., Миронов Д.А., Зайцев А.И., Родионова И.Г., Павлов А.А., Амежнов А.В. Использование биметаллических сталей – путь к повышению ресурса рабочих органов сельскохозяйственных машин // Модернизация сельскохозяйственного производства на базе инновационных машинных технологий и автоматизированных систем: Сборник докладов XII Международной научно-технической конференции. М.: ВИМ, 2012. С. 541-545.

4. Розенбаум А.Н. Исследование износостойкости сталей для режущих органов почвообрабатывающих орудий // Труды ВИСХОМ. 1969. Вып. 53. 123 с.

5. Золотарев С.А. Динамическое взаимодействие почвенного пласта с техническим модулем «корпус – заплужник» // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. N2. С. 23-25.

6. Лискин И.В., Миронов Д.А. Влияние почвенных условий на износ рабочих органов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2013. N5. С. 29-31.

7. Месчан С.Р. Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения. М.: Недра, 1974. 190 с.

8. Лискин И.В., Миронова А.В., Миронов Д.А., Поткин С.Н., Терновский А.А. Модель почвы для исследования износа лезвий // Интеллектуальные машинные

технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства: Сборник научных докладов Международной научно-технической конференции. Ч. 1. М.: ВИМ, 2015. С. 77-80.

9. Godwin R.I., Spoor G. Soil Failure with Narrow Tines. Journal of Agricultural Engineering Research. 1977. Vol. 7; 22: 213-218.

10. Лискин И.В., Миронов Д.А., Сидоров С.А. Равновесие плуга в продольно-вертикальной плоскости // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. N6. С. 41-46.

11. Новожилов В.И. Вопросы определения оптимальных режимов резания // Вопросы определения сравнительной экономичности новой техники. Ленинград: ЛДНТП, 1967. С. 37-51.

12. Синеоков Г.Н. Деформации, возникающие в почве под воздействием клина // Труды ВИСХОМ. 1962. Вып. 33. С. 3-27.

13. Лискин И.В., Сидоров С.А., Миронов Д.А., Миронова А.В. Искусственная почва для исследования закономерностей абразивного изнашивания лезвий // Приоритеты мировой науки: эксперимент и научная дисскусия: Материалы VIII международной научной конференции 17-18 июня 2015 г. Ч. 1. Естественные и технические науки. – North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2015. 157 с.

14. Золоторевский В.С. Механические свойства металлов. М.: Металлургия, 1983. 350 с.

15. Moechnig B.W., Hoag D.L. Dynamic parameters of artificial soils. American social of agricultural engineers. 1985; 9: 79-1042.

REFERENCES

1. Lobachevskiy Ya.P. Strength and deformation characteristics of coherent grassed soils. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2011; 3: 18-20. (In Russian)

2. Izmaylov A.Yu., Sidorov S.A., Lobachevskiy Ya.P., Khoroshenkov V.K., Kuznetsov P.A., Yurkov M.A., Golosienko S.A Scientific principles of increase of wear resistance of working tools of soil-cultivating machinery. *Vestnik rossiyskoy sel'skokhozyaystvennoy nauki*. 2012; 3: 5-7. (In Russian)

3. Lobachevskiy Ya.P., Sidorov S.A., Khoroshenkov V.K., Luzhnova S., Mironov D.A., Zaytsev A.I., Rodionova I.G., Pavlov A.A., Amezhnov A.V. Bimetallic steels use for increase of a resource of working tools of agricultural machines. Modernizatsiya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva na baze innovatsionnykh mashinnykh tekhnologiy i avtomatizirovannykh sistem: Sbornik dokladov XII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Moscow: VIM, 2012: 541-545. (In Russian)

4. Rozenbaum A.N. Research of wear resistance steels for cutting elements of soil-cultivating tools. *Trudy VISKhOM*. 1969; 53: 123. (In Russian)

5. Zolotarev S.A. Dynamic interaction of soil layer with the technical module «plough body – secondary back plough». *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2011; 2: 23-25. (In Russian)

6. Liskin I. V., Mironov D. A. Vliyanie pochvennykh usloviy na iznos rabochikh organov [Influence of soil conditions on wear of working tools]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2013; 5: 29-31. (In Russian)

7. Meschan S.R. Mekhanicheskie svoystva gruntov i laboratornye metody ikh opredeleniya [Mechanical properties of soil and laboratory methods of definition of them]. Moscow: Nedra, 1974: 190. (In Russian)

8. Liskin I.V., Mironova A.V., Mironov D.A., Potkin S.N., Ternovskiy A.A. Soil model for research of blades wear. Intellektual'nye mashinnye tekhnologii i tekhnika dlya realizatsii Gosudarstvennoy programmy razvitiya sel'skogo khozyaystva: Sbornik nauchnykh dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Moscow: VIM, 2015: 77-80. (In Russian)

9. Godwin R.I., Spoor G. Soil Failure with Narrow Tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1977. Vol. 7; 22: 213-218. (In English)

10. Liskin I.V., Mironov D.A., Sidorov S.A. Plow balance in the longitudinally vertical plane. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2014; 6: 41-46. (In Russian)

11. Novozhilov V.I. Questions of definition of optimum modes of cutting. Voprosy opredeleniya sravnitel'noy ekonomichnosti novoy tekhniki. Leningrad: LDNTP, 1967: 37-51. (In Russian)

12. Sineokov G.N. Deformations in the soil under the influence of a wedge. *Trudy VISKhOM*. 1962; 33: 3-27. (In Russian)

13. Liskin I. V., Sidorov S. A., Mironov D. A., Mironova A.V. Artificial soil for research of regularities of abrasive wear of cutting edges. Prioritety mirovoy nauki: eksperiment i nauchnaya disskusiya: Materialy VIII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. 17-18 June 2015. Ch. 1. Estestvennye i tekhnicheskie nauki. North Charleston, SC, USA: CreateSpace, 2015: 157. (In Russian)

14. Zolotorevskiy V.S. Mekhanicheskie svoystva metallov [Mechanical properties of metals]. Moscow: Metallurgiya, 1983: 350. (In Russian)

15. Moechnig B.W., Hoag D.L. Dynamic parameters of artificial soils. *American social of agricultural engineers*. 1985; 9: 79-1042. (In English)

Критерии авторства. Все авторы несут ответственность за представленные в статье сведения и плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution. The authors are responsible for information and plagiarism avoiding.

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

УДК 631.314.02.01 DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-43-48

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ АГРОТЕХНИЧЕСКОГО ПОЛЕВОГО ОПЫТА

Голубев В.В.[1]*, канд. техн. наук; **Кудрявцев А.В.**[1], канд. техн. наук; **Фирсов А.С.**[1], канд. техн. наук; **Сафонов М.А.**[2]

[1]Тверская государственная сельскохозяйственная академия, ул. Садовая, 7, уч. корп. 5, п. Сахарово, г. Тверь, 170904, Российская Федерация, *e-mail: slavasddg@mail.ru
[2]Колледж «Подмосковье», ул. Овражная, 2а, г. Клин, Московская область, 141600, Российская Федерация

Применение современных технологий и инновационных технических средств при возделывании зерновых культур, льна-долгунца, клевера и рапса подчеркивает актуальность проведения многофакторного полевого опыта. Запланированный многолетний полевой опыт определения зависимости урожайности возделываемых сельхозкультур от установленных факторов позволит обосновать основные технологические приемы и подтвердить оптимальные параметры и режимы работы инновационных рабочих органов для выполнения обработки почвы, посева сельскохозяйственных культур и последующей их защиты. По результатам планирования полевого опыта ширина и длина учетной делянки составили 3 и 20 м соответственно. При рендомизированном размещении на возделывание одной сельскохозяйственной культуры понадобилась 81 учетная делянка. Общий размер опытного поля при исследовании трех факторов с тремя уровнями варьирования составил 110 м в ширину и 215 м в длину. Перед началом проведения полевого опыта фиксировали исходное состояние почвенного профиля, агрономические и биологические характеристики почвы. После проведения каждой серии экспериментальных исследований отмечали изменение свойств почвы, а также вегетацию возделываемых сельскохозяйственных культур. Основным откликом проведения полевого опыта служит урожайность. На основании полученных результатов проведения многофакторного полевого опыта планируется освоить вновь возделываемые сельскохозяйственные угодья на площади более 27 га, повысить урожайность сельхозкультур на 17-19 процентов вследствие накопленного почвенного плодородия и внедрения инновационных технологических и технических средств возделывания. Разработанные рекомендации будут реализованы в сельхозпредприятиях Тверской области и на других ближайших регионов Нечерноземной зоны.

Ключевые слова: методика полевого опыта, инновационные рабочие органы, почвообработка, посев, опрыскивание, многофакторный эксперимент.

Для цитирования: Голубев В.В., Кудрявцев А.В., Фирсов А.С., Сафонов М.А. Методика проведения агротехнического полевого опыта // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2017. N4. С. 43-48

TECHNIQUE OF AGROTECHNICAL FIELD EXPERIMENT

Golubev V.V.[1]*, Ph. D. (Eng.); **Kudryavtsev A.V.**[1], Ph. D. (Eng.); **Firsov A.S.**[1], Ph. D. (Eng.); **Safonov M.A.**[2]

[1]Tver state agricultural academy, Sadovaya St., 7, build. 5, set. Sakharovo, Tver, 170904, Russian Federation, *e-mail: slavasddg@mail.ru
[2]College «Podmoskov'e», Ovrazhnaya St., 2a, Klin, Moscow region, 141600, Russian Federation

Application of modern technologies and innovative technical equipment at cultivation of grain-crops, including winter wheat, flax, clover and rape, causes actuality of carrying out the multivariable field test. The planned long-term field experience of determination of dependence of the productivity of the cultivated agricultural cultures on the set factors will allow to justify basic technological methods and confirm optimal parameters and modes of operations of innovative working tools for tillage, sowing and crop protection. By results of planning of field experiment width and length of a plot were 3 and 20 m respectively. At randomized placement for one crop cultivation 81 registration plots were necessary. The general size of the test field at a research of three factors with three levels of variation was 110 m width and 215 m length. Before conducting field experiment the authors fixed an initial condition of a soil profile, agronomical and biological characteristics of the soil. Change of soil properties of the and also crops vegetation was noted at of the end of carrying out studies of each series of tests. The main response of field experiment conducting was the productivity. On the basis

of the received results more than 27 hectares will be cultivated to increase crop productivity by 17-19 percent owing to the saved-up soil fertility and introduction of innovative technological and technical means of cultivation. The developed recommendations will be realized at agricultural enterprises in the Tver' region and in others regions of the of the Non-black earth zone.

Keywords: Technique of field experiment; Innovative working tools; soil cultivation; Seeding; Spraying; Multiple-factor experiment.

For citation: Golubev V.V., Kudryavtsev A.V., Firsov A.S., Safonov M.A. Technique of agrotechnical field experiment. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2017; 4: 43-48. DOI 10.22314/2073-7599-2018-11-4-43-48. (In Russian)

Для повышения почвенного плодородия в современных системах земледелия важно применить технологические и технические средства, наиболее полно отвечающие агротехническим требованиям, с учетом условий функционирования технической системы и особенностей сельхозкультур.

В комплексе технологических операций по возделыванию яровых и озимых культур, в том числе льна-долгунца, рапса в начальный период следует особенно качественно выполнить технологические операции: предпосевную обработку почвы, внесение минеральных удобрений, посев с одновременной заделкой семян и средств защиты растений.

В рамках пилотного проекта в Тверской ГСХА начинается освоение более 2000 га, ранее не используемых в сельскохозяйственном севообороте. Планируется посеять несколько культур, в том числе лен-долгунец, яровой рапс и клевер, подобрать оптимальную технологию их возделывания и инновационные технические средства для ее реализации.

Цель исследования – обоснование комплекса мероприятий и технических средств для возделывания яровых и озимых культур, в том числе льна-долгунца, рапса и клевера, с применением инновационных технологических и технических разработок в условиях сельскохозяйственных угодий Тверской ГСХА.

Материалы и методы. На основании теоретических предпосылок исследований взаимодействия факторов, связанных с комплексом мероприятий по возделыванию льна-долгунца, рапса, пшеницы, клевера, планируется проведение многофакторного полевого опыта 2016-2019 гг. Одной из задач станет учет агроландшафтных условий. На начальном этапе составлена характеристика полевого участка по данным топографических карт. На следующем этапе определяют исходные характеристики почвенного горизонта: тип, механический состав, засоренность растительными остатками, кочками, камнями.

Программой полевых исследований предусмотрено изучение влияния учитываемых факторов на изменение физико-механических и технологических свойств (ФМТС) почвы, а также вегетации растений. Основным откликом является урожайность возделываемых культур. Исследовали качественные показатели функционирования технических систем, количественные значения которых оптимизированы и подтверждены предварительными исследованиями в лабораторно-полевых условиях [1-2]. Последовательность проведения полевого опыта следующая: вначале определить необходимое количество делянок и повторность выполнения экспериментальных исследований, а затем непосредственно провести полевой опыт.

На основании планирования многофакторного эксперимента предусмотрена разбивка исследуемого участка полевого опыта на учетные делянки по существующим методикам [3-4].

Перед началом проведения полевого опыта необходимо определить оптимальное число повторности. На основании методов теории вероятности примем доверительную вероятность 0,7-0,8, поскольку при проведении полевого опыта требуется определить лишь закономерность изменения основного отклика – урожайности культур при варьировании исследуемых факторов. При выбранном математическом методе за основу берутся результаты предварительных исследований в лабораторно-полевых условиях.

На этапе планирования полевого опыта требуется определить оптимальное количество экспериментов, которое должно отличаться от классического метода. Основополагающими критериями математического планирования полевого опыта выбираем воспроизводимость и управляемость уровней варьируемых факторов.

Рассматриваемая модель исследования включает определение влияния следующих факторов: почвенный агрофон, характеризующийся различным видом обработки почвы; качество посева, зависящее от используемых типов сошников; качество распределения пестицидов, на которое влияет тип форсунок опрыскивателя.

В рамках рассматриваемой модели для повышения информативности проведения экспериментальных исследований предусмотрены уровни варьирования для каждого фактора. С учетом теории математического планирования проведения экспериментальных исследований матрица полнофакторного эксперимента (ПФЭ) типа 3^3 будет выглядеть

Table 1 Таблица 1

План-матрица полнофакторного эксперимента типа 3^3
Plan matrix of a full-factorial experiment of 3^3 type

Исследуемые факторы Studied factors	Уровни варьирования / Variability levels		
	нижний (-1) / low (-1)	средний (0) / medium (0)	верхний (+1) / top (+1)
Качество обработки почвы (X_1) Soil cultivation quality (X_1)	фрезерование + культивация rotary tillage + cultivation	фрезерование + выравнивание rotary tillage + smoothing	фрезерование + боронование + прикатывание rotary tillage + harrowing + rolling
Качество посева (X_2) Seeding quality (X_2)	катковый roller	комбинированный integrated	полозовидный runner
Качество опрыскивания (X_3) Spraying quality (X_3)	щелевой slotted	эжекционный ejection	инжекторный injection

следующим образом (*табл. 1*).

В ходе проведения полевого опыта основным откликом служит урожайность. Полевой опыт планируется провести при возделывании яровых культур (зерновые – пшеница, рожь; мелкосеменные – лен-долгунец, яровой рапс) и озимых (пшеница, рожь, рапс). Одновременно при реализации полевого опыта фиксируют изменение качества обработки почвы и вегетацию растений.

Поскольку количество уровней по факторам X_1, X_2 и X_3 равно трем, то число опытов при классическом методе определения находят как:

$$n = m^k, \quad (1)$$

где m – число уровней;

k – число факторов в серии опытов.

Тогда для нашего случая количество опытов при однократном проведении экспериментов составляет 27. При этом общее количество экспериментов, с учетом трехкратной повторности, составляет 81. В качестве контроля используют нормальные технологии возделывания зерновых культур, характерные для рядовых сельскохозяйственных предприятий.

Для подготовки полевого опыта и разбивки участка на делянки осуществляют кодирование значений факторов и уровней [5].

Функция отклика для полевого опыта будет выглядеть следующим образом:

$$y = f(X_1, X_2, X_3), \quad (2)$$

Table 2 Таблица 2

Возможные варианты исследуемых факторов
Possible studied factors

№ опыта Test number	Исследуемые факторы Studied factors кодированные значения coded data			Совместное влияние факторов Joint effect of factors					
	x_1	x_2	x_3	x_2^1	x_2^2	x_3^2	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_3$
1	–	–	–	+	+	+	+	+	+
2	0	–	–	0	+	+	0	0	+
3	+	–	–	+	+	+	–	–	+
4	–	0	–	+	0	+	0	+	0
5	0	0	–	0	0	+	0	0	0
6	+	0	–	+	0	+	0	–	0
7	–	+	–	+	+	+	–	+	–
8	0	+	–	0	+	+	0	0	–
9	+	+	–	+	+	+	+	–	–
10	–	–	0	+	+	0	+	0	0
11	0	–	0	0	+	0	0	0	0
12	+	–	0	+	+	0	–	0	0
13	–	0	0	+	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	+	0	0	+	0	0	0	0	0
16	–	+	0	+	+	0	–	0	0
17	0	+	0	0	+	0	0	0	0
18	+	+	0	+	+	0	+	0	0
19	–	–	+	+	+	+	+	–	–
20	0	–	+	0	+	+	0	0	–
21	+	–	+	+	+	+	–	+	–
22	–	0	+	+	0	+	0	–	0
23	0	0	+	0	0	+	0	0	0
24	+	0	+	+	0	+	0	+	0
25	–	+	+	+	+	+	–	–	+
26	0	+	+	0	+	+	0	0	+
27	+	+	+	+	+	+	+	+	+

где y – урожайность как основной отклик, кг/га;

X_1 – влияние фактора, характеризующего качество обработки почвы;

X_2 – влияние фактора, характеризующего посев возделываемой сельскохозяйственной культуры;

X_3 – влияние фактора, характеризующего качество распределения рабочего материала для защиты растений.

Полученная математическая модель в виде уравнения регрессии может быть описана квадратичной зависимостью:

$$y = b_0+b_1+x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_{11}x_1^2+b_{22}x_2^2+ +b_{33}x_3^2+b_{12}x_1x_2+b_{13}x_1x_3+b_{23}x_2x_3, \quad (3)$$

где x_1, x_2, x_3 – кодовые значения исследуемых факторов;

b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{23} – коэффициенты кодо-

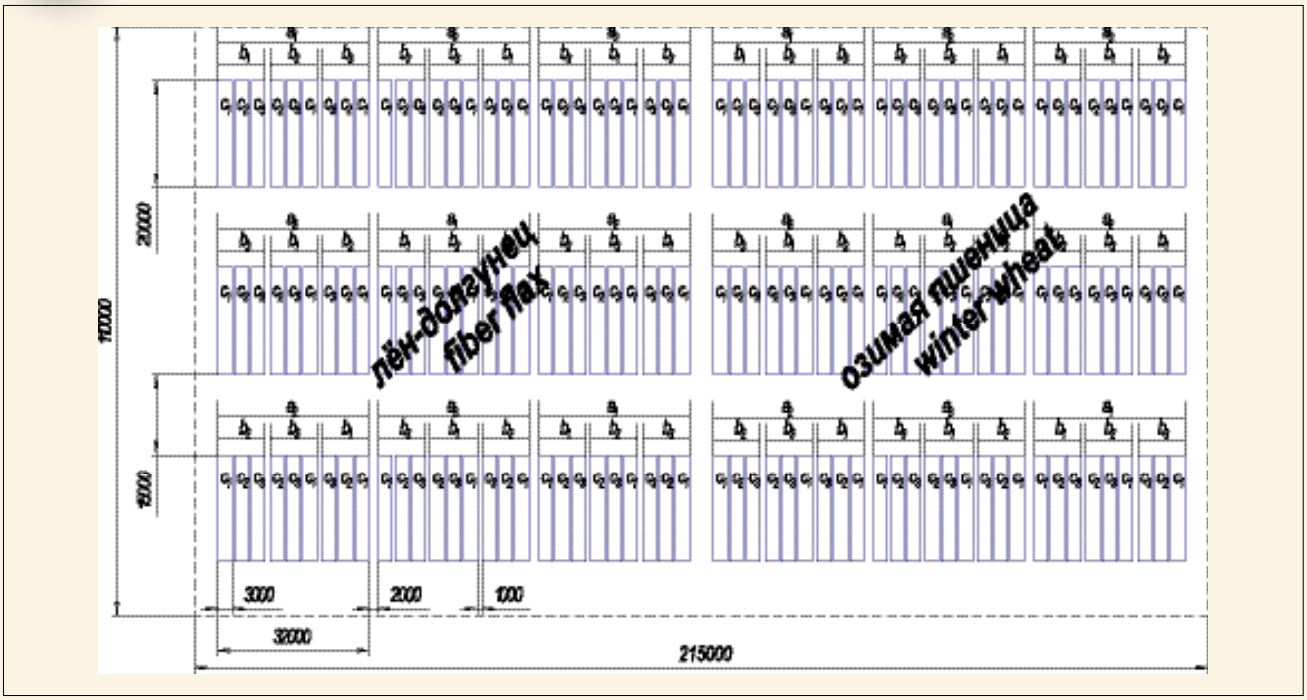


Рис. 1. Схема размещения участков полевого опыта, мм
a_1, a_2, a_3 – уровни варьирования фактора X_1; b_1, b_2, b_3 – уровни варьирования фактора X_2; c_1, c_2, c_3 – уровни варьирования фактора X_3

Fig. 1. Chart of areas placing when the field experience
a_1, a_2, a_3 – levels of X_1 factor variation; b_1, b_2, b_3 – levels of X_2 factor variation; c_1, c_2, c_3 – levels of X_3 factor variation

вых значений исследуемых факторов.

Для реализации полевого опыта и определения коэффициентов уравнения регрессии (3) дальнейшее планирование эксперимента осуществляется с учетом совместного влияния факторов (*табл. 2*).

Перед началом проведения полевого опыта исследуют исходные ФМТС почвы: твердость; прочность почвы на сжатие, изгиб; влажность и плотность; наличие растительности; выровненность участка. Выбор показателей и исследования ФМТС почвы, изменения вегетационных характеристик и урожайности осуществляются в соответствии со стандартными методиками, инструкциями по эксплуатации измерительных средств, требованиями ГОСТ и руководящими документами, а также частными методиками, реализованными при проведении лабораторных и предварительных полевых исследований [5-7].

Схема размещения учетных делянок на полевом опыте реализована рендомизированным способом для снижения влияния вариативности свойств почвы на чистоту проведения эксперимента (*рис. 1*).

Геометрические характеристики участков полевого опыта определяют исходя из выбранной технологии обработки почвы, посева и защиты растений, с учетом технологических, конструктивных и кинематических режимов работы выбранных машинно-тракторных агрегатов. Площадь одной делянки при проведении эксперимента составляет не менее 50 м^2. Размер опытного участка – 110×215 м. Соответственно, площадь всего опытного участка равна 24 725 м^2. Размер одной делянки при однократной повторности проведения эксперимента – 3×20 м, что соответствует предъявляемым требованиям к учетной делянке по площади не менее 50 м^2.

Для проведения агротехнического полевого опыта отведена общая площадь 2,5 га на участке, который не использовали в севообороте более 5-7 лет. В качестве контроля принята стандартная технология обработки почвы, посева и ухода за посевами серийным комплексом машин, рекомендуемым для Нечерноземной зоны. Площадь контрольного участка составляет 200 м^2.

Движение агрегатов запланировано в определенном порядке по схеме. Последовательность воздействия каждого учитываемого уровня исследуемого фактора полнофакторного эксперимента отражена на фрагменте полевого опыта (*рис. 2*) на примере возделывания озимой пшеницы.

Размеры поворотных полос с учетом применяемых рабочих органов и установленных максимальных размеров машинно-тракторных агрегатов для чистоты проведения полевого опыта определяют по выражению:

$$E = 3R + e, \quad (4)$$

где R – радиус поворота агрегата, м;

e – длина выезда агрегата или расстояние от центра агрегата до крайних рабочих органов сельскохозяйственных машин, м.

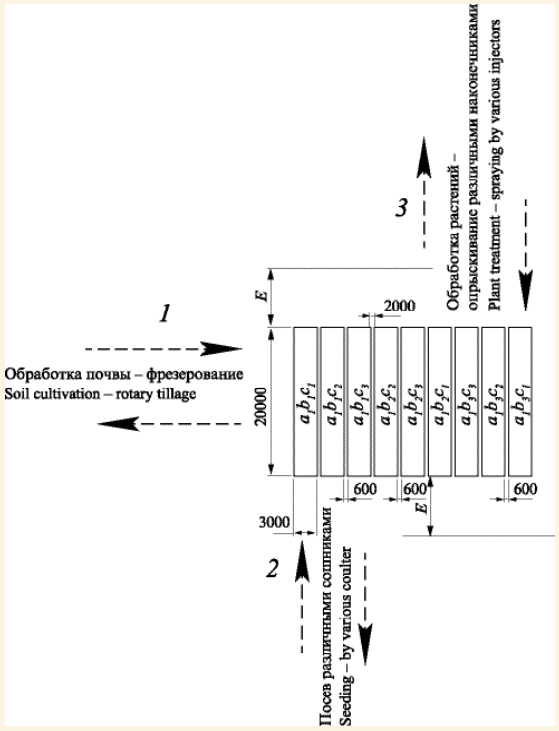


Рис. 2. Фрагмент опытного поля однократной повторности 1, 2, 3 – очередность выполнения технологических операций исследуемых факторов

Fig. 2. Fragment of test field of single (In Russian) 1, 2, 3 – sequence of performance of technological operations of the studied factors

При проведении полевого опыта планируется:

- определить гранулометрический состав почвы;
- измерить исходную плотность почвы, а также после ее обработки, посева и опрыскивания;
- вычислить объемную массу почвы, ее влажность, твердость, капиллярную влагоемкость и пористость. Объемную массу контролируют в пробах в течение вегетационного периода по фазам роста и развития сельхозкультур по слоям почвенного горизонта 0-10 см; 10-20 и 20-30 см, определяя по формуле:

$$V_П = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h, \quad (5)$$

где d – диаметр измерительного цилиндра (со стороны заглубления), см;

h – высота почвенного образца в измерительном цилиндре, см.

Влажность почвы исследуют одновременно с плотностью, руководствуясь следующими формулами:

– абсолютная влажность почвы (ω, %):

$$\omega = \frac{m_В}{m_П} \cdot 10^2, \quad (6)$$

где $m_В$ – масса воды, испарившейся из пробы, г;

$m_П$ – масса абсолютно сухой почвы, г;

– относительная влажность почвы (ω', %)

$$\omega' = \frac{m_В}{m'_П} \cdot 10^2, \quad (7)$$

где $m_П'$ – масса сырой почвы (навески), г.

При определении твердости почвы ($P_П$, %) твердомером Ревякина Ю.Ю. допустима погрешность измерения не более 5%. В этом случае применима формула:

$$P_П = \frac{h_{ср} \cdot a_П}{10 \cdot S_П}, \quad (8)$$

где $h_{ср}$ – значение средней ординаты диаграммы твёрдости, см;

$a_П$ – коэффициент сжатия пружины, кг/см;

$S_П$ – площадь сечения наконечника твердомера, см^2.

Капиллярную влагоемкость измеряют методом насыщения образцов с ненарушенной структурой.

Пористость (P, %) и аэрацию (A, %) почвы рассчитывают по следующим формулам:

$$P = \left(1 - \frac{V}{d}\right) \cdot 100, \quad (9)$$

где V – объемная масса почвы, г/см^3;

d – плотность почвы, г/см^3;

$$A = P - V \cdot m_В. \quad (10)$$

Применение предложенной последовательности и методики определения показателей установленного отклика позволит повысить информативность полученных данных, точность проведения расчетов для последующей реализации на сельскохозяйственных предприятиях Нечерноземной зоны.

Результаты и обсуждение. При оценке качества выполнения технологических операций измеряют:

- глубину хода рабочих органов почвообрабатывающих машин в 15 точках на одной делянке методом конверта;
- глыбистость поверхности до и после прохода – методом наложения квадратной рамки площадью 0,25 м^2 в пятикратной повторности, причем глыбы разделяют на фракции 5,0-10,0 см, 10,1-15,0 и 15,1-25,0 см, после чего рассчитывают указанный показатель (%);
- комковатость почвы (%) до и после прохода агрегата – наложением рамки площадью 0,25 м^2 на поверхность участка в трехкратной повторности, причем почвенные комки размером до 50 мм раскладывают на фракции – 10-20 мм; 21-30 мм; 31-40 мм; 41-50 мм, после чего рассчитывают суммарную площадь почвенных элементов.

При производстве полевого опыта учитывают рельеф почвенного профиля в соответствии с требованиями ГОСТ. Уклон поля определяют нивелиром марки *EFT AL – 32 No 050178*. Нивелирование поверхности поля проводят по всей поверхности участка испытаний. Отклик изменения характеристик ФМТС почвы измеряли с помощью полевой лаборатории Литвинова И.М., а также приборно-

го обеспечения кафедры технологических и транспортных машин и комплексов.

Для эффективности влияния опрыскивания учитывали объем сорняков по массе. Для этого на учетных делянках на уровне поверхности почвы, срезали культурные растения и сорняки и раздельно их взвешивали. На весах ВЛК – 500 с погрешностью измерения + 1 г. Результаты записывали в виде приложения по соответствующей форме. Засоренность (Зс, %) посевов и почвы сорной растительностью рассчитывали по формуле:

$$З_c = \frac{g_c}{g_к + g_c} \cdot 10^2, \quad (11)$$

где g_c – масса сорняков на учетной делянке, г;

$g_к$ – масса сельскохозяйственной культуры на учетной делянке, г.

После расчета по данной формуле высчитывают среднюю засоренность почвы и посева как среднее арифметическое значение всех учетных площадок одной серии опыта.

Выводы. На основании полученных результатов проведения многофакторного полевого опыта планируется освоение вновь задействованных сельскохозяйственных угодий. Ожидаемое повышение урожайности возделываемых сельскохозяйственных культур от внедрения технологических мероприятий и инновационных технических средств составляет в среднем 17-19% от контрольного варианта. Разработанные рекомендации планируется реализовать в хозяйствах Тверской области и других ближайших регионов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кудрявцев А.В. Машина для улучшения лугов и пастбищ // Современные проблемы науки и образования. 2013. N5. С. 690-695.

2. Сафонов В.В., Голубев В.В., Андреев А.Н. Сошник прямого высева // Агропродовольственный сектор экономики страны в условиях глобализации и интеграции: Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции 7-9 июня 2016 г. Тверь: ЦНиОТ, 2016. С. 148-152.

3. Горбачёв И.В., Сафонов М.А. Лабораторные испытания инжекторного распылителя // Агропродовольственный сектор экономики страны в условиях глобализации и интеграции: Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции 7-9 июня 2016 г. Тверь. ЦНиОТ, 2016. С. 143-148.

4. Хайлис Г.А., Ковалёв М.М. Исследование сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных. М.: Колос, 1994. 169 с.

5. Литвинов С.С. Методика полевого опыта в овощеводстве. М.: ВНИИ овощеводства. 2011. 650 с.

6. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

7. Кудрявцев А.В. Физические и технологические свойства кочек закочкаренных лугов и пастбищ // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2015. N2. С. 28-32.

REFERENCES

1. Kudryavtsev A.V. Machine for meadows and pastures improvement. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013; 5: 690-695. (In Russian)

2. Safonov V.V., Golubev V.V., Andreev A.N. Supply coulter for direct seeding. Agroprodovol'stvennyy sektor ekonomiki strany v usloviyakh globalizatsii i integratsii: Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 7-9 June 2016. Tver': TsNiOT, 2016: 148-152. (In Russian)

3. Gorbachev I.V., Safonov M.A. Laboratory researches of injector spray nozzle. Agroprodovol'stvennyy sektor ekonomiki strany v usloviyakh globalizatsii i integratsii: Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii 7-9 June 2016. Tver': TsNiOT, 2016: 143-148. (In Russian)

4. Khaylis G.A., Kovalev M.M. Issledovanie sel'skokhozyaystvennoy tekhniki i obrabotka opytnykh dannykh [Agricultural machinery investigation and experimental data processing] Moscow: Kolos, 1994: 169. (In Russian)

5. Litvinov S.S. Metodika polevogo opyta v ovoshchevodstve [Field techniquet in vegetable growing]. Moscow: VNII ovoshchevodstva. 2011: 650. (In Russian)

6. Dospekhov B.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy) [Technique of field experiment (with bases of statistical processing of research results)]. Moscow: Agropromizdat, 1985: 351. (In Russian)

7. Kudryavtsev A.V. Adaptive energy-savig cultivator for stony soils cultivation. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2015; 2: 28-32. (In Russian)

Критерии авторства. Все авторы несут ответственность за представленные в статье сведения и плагиат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution. The authors are responsible for information and plagiarism avoiding.

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

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Журнал **«Сельскохозяйственные машины и технологии»** входит в Перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации трудов соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук по следующей тематике:
- *сельскохозяйственные науки;*
- *сельскохозяйственные машины и технологии;*
- *механизация, электрификация и автоматизация сельского хозяйства;*
- *экономика сельского хозяйства.*

Журнал включен в систему Российского индекса цитирования и в Международную информационную систему по сельскому хозяйству *AGRIS*. Электронные версии журнала размещаются на сайтах Российской универсальной научной электронной библиотеки.

Статья, направляемая в журнал для публикации, должна соответствовать основной тематике журнала.

Редакция принимает рукописи и электронные версии статей, **набранные в Word шрифтом 14 пт. через 1,5 интервала, не более 12 страниц**.

Необходимо приложить рецензию на статью.

Статьи аспирантов печатаются бесплатно.

Приведенные в статье формулы должны иметь пояснения и расшифровку всех входящих в них величин с указанием единиц измерения в *СИ*. Графические материалы должны быть приложены в виде отдельных файлов: фотографии – *jpg* или *tif* с разрешением *300 dpi*, графики, диаграммы – в *eps* или *ai*. Все графические материалы, рисунки и фотографии должны быть пронумерованы, подписаны и иметь ссылку в тексте.

Простые внутристрочные и однострочные формулы должны быть набраны символами в редакторе формул *Microsoft Word* без использования специальных редакторов. Не допускается набор: часть формулы символами, а часть – в редакторе формул. **Если формулы заимствованы из других источников, то не следует приводить в них подробных выводов: авторы формул это уже сделали, повторять их не следует. Ссылки на обозначения формул обязательны. Статья должна содержать не более 10 формул, 3-4 иллюстрации, 3-4 таблицы, размер таблиц – не более 1/2 страницы.**

В каждой статье должны быть указаны следующие данные:
- *название статьи;*
- *фамилия и инициалы автора(ов);*
- *e-mail автора, контактный телефон;*
- *место работы автора (аббревиатуры не допускаются), почтовый адрес;*
- *ученая степень, ученое звание автора;*
- *реферат (объем 200-250 слов);*
- *ключевые слова;*
- *литература.*

Статью следует структурировать, обязательно указав следующие разделы:
- *Введение (актуальность);*
- *Цель исследований;*
- *Материалы и методы;*
- *Результаты и обсуждение;*
- *Выводы.*

Списки литературы **(до 10 источников за последние 5 лет)** следует оформлять по ГОСТ Р 7.05-2008.

Статьи, поступившие в редакционный отдел, печатаются при наличии рецензии. Отрицательная рецензия является основанием для отказа публикаций статьи.

Реферат

Реферат – это самостоятельный законченный материал. Вводная часть минимальна. Нужно коротко и емко отразить актуальность и цель исследований, условия и схемы экспериментов, привести полученные результаты (с обязательным аргументированием на основании цифрового материала), сформулировать выводы.

Объем реферата – 200-250 слов.

Нельзя использовать аббревиатуры и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы).

На английский язык следует перевести:
- *название статьи;*
- *полное название научного учреждения;*
- *реферат и ключевые слова;*
- *подрисуночные подписи и таблицы;*
- *названия литературных источников.*

Машинный перевод недопустим!

Рукопись статьи должна быть подписана лично авторами. Автор несет юридическую и иную ответственность за содержание статьи.

Несоответствие статьи хотя бы одному из перечисленных условий может служить основанием для отказа в публикации.

ПОДПИСКА 2018

КАК подписаться на журнал?

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Подписку на первое полугодие 2018 г. можно оформить до 20 декабря включительно в почтовых отделениях связи по каталогу агентства «РОСПЕЧАТЬ»

Подписной индекс 35825

ЖУРНАЛ «СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИИ» ВКЛЮЧЕН В ПЕРЕЧЕНЬ ВАК

Редакция журнала:

Тел.: 8 (499) 174-88-11, 8 (499) 174-89-01

E-mail: smit@vim.ru