



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.

Журнал включен
в Российский индекс
научного цитирования (РИНЦ)

Полные тексты статей
размещены на сайте электронной
научной библиотеки: <http://elibrary.ru>

Охраняется законом РФ № 5351-1
«Об авторском праве и смежных правах»
от 9 июля 1993 года. Контент распростра-
няется под лицензией Creative Commons
Attribution 4.0 License. Нарушение закона
будет преследоваться в судебном порядке.

НАД НОМЕРОМ РАБОТАЛИ:
Л.А. Горелова,
В.В. Бижаев,
Р.М. Нурбагандова

Перевод – Алексей Алипичев

АДРЕС РЕДАКЦИИ:
109428, Москва,
1-й Институтский проезд, 5
Телефоны: (499) 174-88-11
(499) 174-89-01

<http://www.vimsmit.com>
e-mail: smit@vim.ru

© ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, 2018

Отпечатано в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Формат 205 x 290 мм
Подписано в печать 15.10.2018
Тираж 500 экз.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Андрей Юрьевич Измайлов

доктор технических наук, академик Российской академии наук, член Президиума Российской академии наук, директор Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Виктор Валентинович Альт

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, заслуженный деятель науки Российской Федерации, академик НАН Монголии, руководитель научного направления Сибирского физи-ко-технического института аграрных проблем, г. Новосибирск, Российская Федерация

Христо Иванов Белоев

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Болгарской академии наук, Русенский университет, г. Русе, Республика Болгария

Михаил Никитиевич Ерохин

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Российский государственный аграрный университет – Московская сельскохозяйственная академия имени К.А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

Юрий Анатольевич Иванов

доктор сельскохозяйственных наук, профессор, академик Российской академии наук, директор Всероссийского научно-исследовательского института механизации животноводства, г. Подольск, Российская Федерация

Йошисукэ Кишида

академик, Президент компании «Шин-Норинша», г. Токио, Япония

Иван Михайлович Куликов

доктор экономических наук, профессор, академик Российской академии наук, директор Всероссийского селекционно-технологического института садоводства и питомниководства, Москва, Российская Федерация

Юрий Федорович Лачуга

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, академик-секретарь Отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

Яков Петрович Лобачевский

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, первый заместитель директора Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация

Антонин Махалек

доктор технических наук, директор Научно-исследовательского института сельскохозяйственной техники, г. Прага, Чешская Республика

Тадеуш Павловски

доктор технических наук, профессор, директор Промышленного института сельскохозяйственной техники, г. Познань, Республика Польша

Владимир Дмитриевич Попов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, руководитель научного направления Института агроинженерных и экологических проблем сельскохозяйственного производства, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Жарылкасын Сарсембекович Садыков

доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института агроинженерных проблем и новых технологий Казахского национального агроуниверситета, г. Алматы, Республика Казахстан

Дмитрий Семенович Стребков

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Юлия Сергеевна Ценц

кандидат педагогических наук, доцент, начальник отдела образования, научно-технической информации и редакционно-издательской деятельности Федерального научного агроинженерного центра ВИМ, Москва, Российская Федерация

Вячеслав Иванович Черноиванов

доктор технических наук, профессор, академик Российской академии наук, Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация



SCIENTIFIC-TEORETICAL
JOURNAL

The journal is registered by
Federal Agency for Supervision of
Legislation Observance of Mass
Communications Sphere and
Cultural Heritage Protection
Certificate ПИ No. ФЦ77-68608
from February, 3, 2017

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

Protected by the Russian Federal
Law RF №5351-1 "On Copyright
and Related Rights" dated July 9,
1993. Content is distributed under
Creative Commons Attribution 4.0
License. Violations are subject to
prosecution.

EXECUTIVE EDITORS:

Gorelova L.A.,
Bizhaev V.V.,
Nurbagandova R.M.

Translation into English –
Aleksei Alipichev

EDITORIAL OFFICE'S ADDRESS

109428, Moscow,
1st Institutskiy proezd, 5
Tel.: +7 (499) 174-88-11
+7 (499) 174-89-01

<http://www.vimsmit.com>
e-mail: smit@vim.ru

Printed by FSAC VIM
Russian Academy of Science

The format is 205 × 290 mm
The issue was submitted 15.10.2018
The circulation is 500 copies

[SEL'SKOKHOZYAYSTVENNYE MASHINY I TEKHNologii]

**Founder and publisher: Federal State Budgetary Scientific Institution
"Federal Scientific Agroengineering Center VIM" of the Russian Academy of Science**

EDITOR-IN-CHIEF

Andrey Yu. Izmaylov

Dr.Sc.(Eng.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Academic Board Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

EDITORIAL BOARD

Viktor V. Al't

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Honoured Scientist of Russian Federation, Academician of NAS of Mongolia, Head of Scientific Division of Siberian Institute of Physics and Technology of Agrarian Problems, Novosibirsk, Russian Federation

Khristo I. Beloev

Dr. Sc. (Eng.), Professor, Corresponding Member of the Bulgarian Academy of Sciences, University of Ruse, Republic of Bulgaria

Mikhail N. Erokhin

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Yuriy A. Ivanov

Dr.Sc.(Agr.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences; Director of the All-Russian Scientific and Research Institute of Livestock Mechanization, Podolsk, Russian Federation

Yoshisuke Kishida

Academician, President Shin-Norinsha Co., LTD, Tokyo, Japan

Ivan M. Kulikov

Dr.Sc.(Econ.), Professor, Member of the Russian Academy of Sciences, Director of the All-Russian Horticultural Institute for Breeding, Agrotechnology and Nursery, Moscow, Russian Federation

Yuriy F. Lachuga

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Academician Secretary of Department of Agricultural Sciences at the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Yakov P. Lobachevskiy

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, First Deputy Director of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Antonin Makhalek

Dr.Sc.(Eng.), Director of the Agricultural Machinery Research Institute, Prague, Czech Republic

Tadeush Pavlovsky

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Director of the Industrial Institute of Agricultural Machines, Poznan, Poland

Vladimir D. Popov

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Head of the Research Direction of the Institute of Agroengineering and Environmental Problems of Agricultural Production, St.Peterburg, Russian Federation

Zharylkasyn S. Sadykov

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Director of Research Institute of Agroengineering Problems and New Technologies, Kazakh National Agrarian University, Almaty, Republic of Kazakhstan

Dmitriy S. Strebkov

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Yulia S. Tsench

Ph.D.(Ed.), Associate Professor, Head of Publishing Activity, Education and Technical information Department of the Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Vyacheslav I. Chernouvanov

Dr.Sc.(Eng.), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ**

Измайлов А.Ю., Хорт Д.О., Филиппов Р.А.,
Кутырёв А.И., Смирнов И.Г.

Анализ работы автоматизированного агрегата для магнитно-импульсной обработки земляники садовой в полевых условиях4

Лебедев А.Т., Искендеров Р.Р., Шумский А.С.
Обоснование конструктивных параметров горизонтального роторного агрегата для дробления фуражного зерна9

Алакин В.М., Никитин Г.С.
Результаты исследований технологического процесса картофелекопателя14

ТЕХНИКА ДЛЯ РАСТЕНИЕВОДСТВА

Есхожин Д.З., Нукешев С.О., Личман Г.И.,
Ахметов Е.С., Есхожин К.Д.
Обоснование параметров лепесткового ворошителя высевающего устройства зернотукотравяной сеялки20

МОБИЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Арженовский А.Г., Козлов Д.С., Петрищев Н.А.
Метод получения тяговой характеристики трактора в эксплуатационных условиях . . .25

СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ РАСТЕНИЙ

Марченко Л.А., Сафонов М.А.
Обоснование конструктивно-технологических параметров инжекторного распылителя31

ПОСЛЕУБОРОЧНАЯ ОБРАБОТКА ЗЕРНА

Лобачевский Я.П., Павлов С.А.
Инфракрасная сушка семян в псевдоожиженном слое39

Ключников А.С.
Определение производительности модулей нового универсального сушильного агрегата44

NEW MACHINERY AND TECHNOLOGIES

Izmaylov A.Yu., Khort D.O., Filippov R.A.,
Kutyrev A.I., Smirnov I.G.
Operation analysis of automated unit for magnetic pulse treatment of garden strawberry.4

Lebedev A.T., Iskenderov R.R., Shumsky A.S.
Determination of the design parameters for horizontal rotary crusher for feed grain9

Alakin V.M., Nikitin G.S.
Research results of the potato digger technological process.14

MACHINERY FOR PLANT GROWING

Yeskhozhin D.Z., Nukeshev S.O., Lichman G.I.,
Akhmetov Ye.S., Yeskhozhin K.D.
The lobe-type agitator parameters of the seed-metering unit in the seed-fertilizer drill justification20

MOBILE ENERGY

Arzhenovskiy A.G., Kozlov D.S., Petrishchev N.A.
Determining the traction characteristic of a tractor in operating conditions25

PLANT PROTECTION PRODUCTS

Marchenko L.A., Safonov M.A.
Determination of an injection sprayer's technological parameters31

POSTHARVEST PROCESSING OF GRAIN

Lobachevsky Ya.P., Pavlov S.A.
Infrared drying of seeds in a fluidized bed39

Klyuchnikov A.S.
Determination of the performance of new universal dryer modules44

Operation Analysis of Automated Unit for Magnetic Pulse Treatment of Garden Strawberry

Andrey Yu. Izmaylov,

Dr.Sc.(Eng.), academician of the Russian academy of sciences, director;

Dmitriy O. Khort,

Ph.D.(Agri.), key research engineer;

Rostislav A. Filippov,

Ph.D.(Agri.), key research engineer;

Aleksei I. Kutyrev,

junior research engineer,

e-mail: alexeykutyrev@gmail.com;

Igor G. Smirnov,

Ph.D.(Ag), key research engineer

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Federal Scientific Agroengineering Center VIM conducts research and development work on the determination of parameters, technical characteristics of machines and operating modes of magnetic pulse treatment (MPT) of plant material in field conditions. (*Research purpose*) To analyze systems of adaptation of the working elements of an automated unit in field conditions during the technological operation of magnetic pulse treatment of strawberry. (*Materials and methods*) To ensure the quality of the technological operation of irradiating plants with a low-frequency magnetic field, as well as to maintain the required value of magnetic induction in the working area, an automated system of adaptation of the working elements of the unit has been developed. The experiment has been carried out for three times on the plot of garden strawberry with a length of 140 m using an automatic system of adaptation of the working elements of the unit and without its use. To control the travel speed use has been made of an electronic GPS speedometer. Operating modes of pulse magnetic treatment (frequency, duty factor, exposure time) have been selected for the ВИМ-МИО device and the БСА-01 automated control unit. To control the distance between the object of magnetic pulse treatment and the working element, use has been made of a measuring tape, a laser rangefinder (Amtast AMF106) and a laser sensor (Laser sensor VL53L0X) mounted on the magnetic inductor of the automated unit. For monitoring and keeping the obtained experimental data, the authors have used the program Advanced Serial Port Monitor 4.4.9 (*Results and discussion*) As a result of the experiment, the authors have determined the dependence of the deviation of the working surface position of magnetic inductors from the required distance. The maximum and minimum values of distances between the plant and the working element of an automated mounted unit during the technological operation of magnetic pulse treatment have been found. (*Conclusions*) The analysis of the experimental data calculation results has shown that the variation scope of the data obtained by using an automated adaptation system of the working elements is 2.1 times less than in case with a disabled system. The coefficient of variation of the obtained values (a measure of deviation from the standard value) when using the adaptation system of the working elements is 2.35 times less than in case with a disabled system. The developed system of automated adaptation of the working elements provides a distance of 0.18-0.25 m between the working elements of the unit and plant objects, which allows to maintain the required value of magnetic induction of 5 MT in the treatment zone. The authors have established parameters of the working elements necessary for magnetic pulse treatment of garden strawberry in the field conditions: 48 turns of a cable of 1x2.5 mm with an outer diameter of 400 mm, an inner diameter of 30 mm, and an inductance of 373 μ H.

Keywords: automated unit, magnetic pulse treatment, adaptation system, magnetic inductors, garden strawberry.

For citation: Izmaylov A.Yu., Khort D.O., Filippov R.A., Kutyrev A.I., Smirnov I.G. Operation analysis of automated unit for magnetic pulse treatment of garden strawberry. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. 12(5). 4-8. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-4-8. (In Russian).

Most of the equipment designed for the magnetic pulse treatment (MPT) of plants was developed without involving a scientific explanation of the magnetic and biological effects and studying the machines for their implementation, basing on empirical dependencies obtained exclusively in laboratory studies. To design specialized equipment and find out the

optimal modes of magnetic impulse treatment of plants in industrial horticulture, it is necessary to conduct research and development projects to determine the parameters, technical characteristics of machines and operating modes of equipment to be used on plant objects in the field [1].

THE RESEARCH PURPOSE is to analyze a system of

adaptation of the working elements of an automated unit in field conditions when carrying out the technological operation of magnetic pulse treatment of garden strawberry.

MATERIALS AND METHODS. Analysis of the ongoing research on the bioregulatory activation of horticultural crops has shown the high efficiency of using a low-frequency pulsed magnetic field of low intensity modulated in amplitude and frequency, *Table 1* [2-4].

inductors changes, which leads to a change in the position of the working zone of interaction with the necessary modes [7-9]. In addition to irregularities, the working element also adapts to the change of agrotechnological parameters of plants, dimensional parameters of bushes and their structure [10].

To ensure high-quality technological operation of MPT on garden strawberry with a low-frequency magnetic field and maintain the required magnitude

EFFECT OF MAGNETIC FIELDS ON GARDEN PLANTS				
Name of plant	Part of the plant	Exposure parameters	Effect	Authors
Wild strawberry (<i>Fragaria vesca</i>)	Seedlings	0.096 Тл (Т) 0.192 Тл (Т) 0.384 Тл (Т)	Increase in productivity (+) Increase in number of fruits (+)	Esitken A. и Turan M. (2004)
Fragaria "Ananasnaya"	Vegetative part	0.096 Тл (Т) 50 Гц (Hz)	Increase of productivity (+) Content of Ca, Mg (+)	Esitken A. и Turan M. (2004)
		0.192 Тл (Т) 0.384 Тл (Т) 50 Гц (Hz)	Increase in the number of fruits (-) Increase in productivity (-)	
Apples, apricots	Seeds	60 мТл (mT)	Germination energy (+)	Chao и Walker (1967)
Strawberry, pear	Seeds, Vegetative part	5 мТл (mT) 16 Гц (Hz) 50-100 Гц (Hz)	Increase in productivity (+) Increase in the number of fruits (+) Increase in germination energy (+)	Donetskikh V.I. (2016)

The effect of MPT on horticultural crops improves the digestibility of substances and microelements, accelerates the growth and development of crops, increases the permeability of cell membranes and the quality of planting material and yield [5, 6]. As a result of field experiments, it has turned out that the mode of operation of the MPT unit, which meets the following parameters, has proved to be most effective for stimulating the life processes in the vegetative parts of horticultural crops:

- travel speed V of 2.5 km/h;
- frequency of magnetic field pulses of 15.325 Hz;
- duty cycle of 16,145;
- magnetic induction in the irradiation zone of 5.05 mT;
- a rectangular shape of magnetic pulses;
- the vector of magnetic induction directed vertically down.

These parameters can be obtained using the developed ВИМ-МИО device with a working element (the magnetic inductor) in the form of a flat spiral coil. When performing technological operations of MPT in field conditions, an automated unit with a tractor (the mobile unit - MU) moves along the plantation and hits irregularities that do not exceed the agricultural background requirements for the cultivated crop (*Fig. 1*). When the MU runs over unevenness, the position of magnetic



Fig. 1. Performance of technological operations of MPT on garden strawberry by an automated unit

1 – the frame of the automated MPT unit; 2,3 – actuators for changing the angle inclination of the working elements and maintaining a predetermined distance between plants and working elements; 4 – working elements of the automated unit (magnetic inductors); 5 – the ВИМ-МИО device of magnetic pulse treatment of plants; 6 – automated control unit for the adaptation system BCA-01

of magnetic induction in the working area, an automated system for the adaptation of the working parts of the unit has been developed (Certificate 2018614946) [11, 12].

Actuators (electric cylinders) adjust the magnetic inductors of the MPT unit to the agrotechnological parameters of plants automatically, depending on the distance of ultrasonic sensors to the MPT object and the selected mode of operation [7].

The analysis of the adaptation system performance of the working elements of the automated mounted MPT unit have been carried out for an industrial plantation of garden strawberry in the scientific and production test department of the VSTISP (Moscow region, Leninsky district, the village of Bulatnikovo), Table 2.

Table 2 CHARACTERISTICS OF THE SITE FOR PRODUCTION TESTING OF AN MPT UNIT	
Crop, variety	“Festivalnaya” strawberry variety
Planting pattern, cm	80×20
Age of plantations, years	2
Average height of a bush, cm	25.2
Average width of a bush, cm	30.4
Deviation of bushes from the center line of a row, cm	4.5
Average height of weed vegetation, cm	23.6

The experiment was conducted on a plot of 140 m long with a threefold repetition using an automatic system of adaptation of the working elements of the unit and without it. Magnetic inductors in the form of a flat spiral coil were used as the working elements of the automated MPT unit. The magnitude of the magnetic field at a distance of 100 mm from the center of the coil is 0.0050572 T [8].

To control the speed of motion use was made of a GPS-speedometer. The MPT modes (frequency, duty cycle, and exposure time) are set on the ВИМ-МНО device and the БСА-01 automated control unit (Fig. 2) [9].

When performing a MPT process operation using MU, the laser sensor transmitted the distance between the plant and the working unit to the laptop via the serial port (COM-port) in a real-time mode. The monitoring and saving of the experimental data were performed using the *Advanced Serial Port Monitor 4.4.9* app program (Fig. 3).

The average linear deviation from the arithmetic mean of the data obtained is determined by the formula:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n |X - \bar{X}|}{n}, \quad (1)$$

where X is the analyzed indicator, cm; n is the number of values in the analyzed data set, pieces; $\bar{X}$ – is the mean value of indicators, cm:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (2)$$



Fig. 2. Measuring distance from the working elements to the plant and the magnetic induction when performing the technological operation of MPT

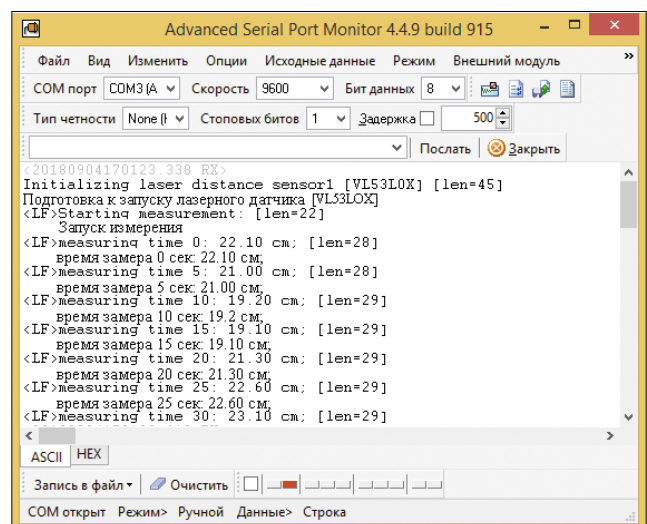


Fig. 3. COM-port monitoring while performing the technological operation of MPT

The variance s^2 of the obtained data is determined by the formula:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}{n - 1}. \quad (3)$$

The standard deviation is calculated by the formula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}{n - 1}}. \quad (4)$$

All the indicators discussed above are tied to the scale of the source data and do not allow to get a figurative idea of the variation of the analyzed set of

obtained data. To obtain a relative measure of the data variation, the coefficient of variation V and the oscillation coefficient P were used:

$$V = \frac{s}{\bar{X}}, \quad (5)$$

$$P = \frac{R_x}{\bar{X}}, \quad (6)$$

where R_x – is the variation range of the random variable x , cm: $R_x = x_{\max} - x_{\min}$ [12].

RESULTS AND DISCUSSION. As a result of the experiment, a graph of the deviation of the position of the working surface of magnetic inductors from the required distance has been made (Fig. 4).

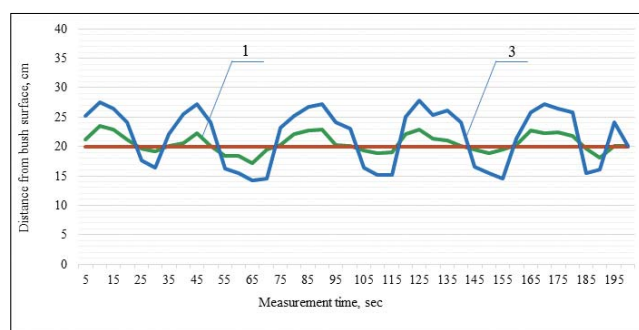


Fig. 4. Graphs of deviation in the position of the working surface of magnetic inductors from the required distance:

1 – the position of a magnetic inductor using the adaptation system, 2 – the required distance to a garden strawberry bush, 3 – the position of a magnetic inductor without using the adaptation system

According to the calculation results, the maximum and minimum distances between the working elements of the unit and the plants, the range of variation, the average linear deviation, the standard deviation, the variance, the coefficient of variation and oscillation have been determined, Table 3.

In the course of the field experiments, the parameters of the magnetic field in the near zone of a flat spiral coil have been obtained for various operating modes of the ВИМ-МНО unit. It has been established that the distribution of force lines in simulation and experiment are identical (Fig. 5).

As the distance from the center of the coil increases, the vector of magnetic induction increases. When going beyond the coil with a radius of 115 mm, the magnetic field changes direction and weakens, as it moves away from the conductor. Closer to the edge of the spiral and outside its plane, the level of tension decreases to small values.

CONCLUSIONS

1. An analysis of the experiment results has shown that the range of variation of the obtained data when using an automated system for adapting the working

The rate of variation	Values obtained using an automatic adaptation system	Values obtained without using an automatic adaptation system
Maximum, cm	23.56	27.84
Minimum, cm	17.22	14.24
The range of variation, cm	6.34	13.6
Average linear deviation, cm	1.33	4.37
Variance based on the general population, cm ²	2.42	22.67
Variance based on a sample, cm ²	2.49	23.26
Standard general deviation, cm	1.56	4.76
Standard deviation of the sample, cm	1.58	4.82
Coefficient of variation, %	8	22
Coefficient of oscillation	0.31	0.63

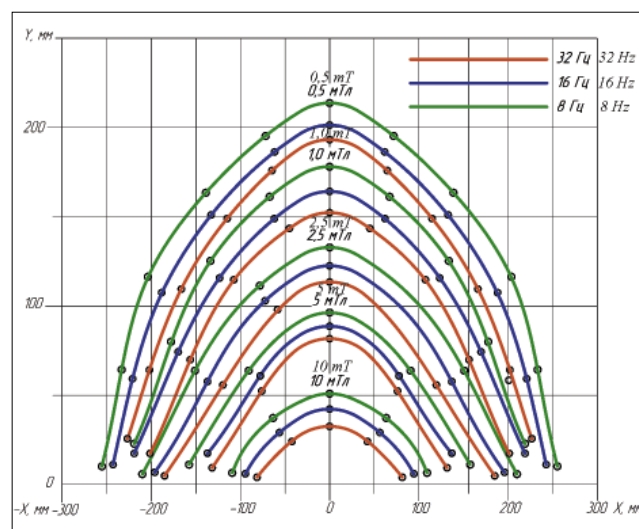


Fig. 5. Induction distribution of a pulsed magnetic field for various treatment modes, at a pulse repetition rate of 8, 16 and 32 Hz

elements is 2.1 times smaller than with the turned-off system. The coefficient of variation when using the system of adaptation of the working elements is 8%, while with the turned-off system it amounts to 22%. Reducing the coefficient of variation leads to an increase in the uniformity of the magnetic induction distribution in the treatment area of up to 2.5 times. The use of an automatic system ensures the accuracy of the MPT technological operation with a general dispersion of 2.42.

2. The developed system of automated adaptation of the working elements ensures the distance between the working elements of the unit and plant objects

within 0.18-0.25 m, which allows maintaining the required magnetic induction in the treatment area of 5 mT.

3. The authors have determined the parameters of the working elements required for magnetic pulse

treatment of garden strawberry in the field conditions: 48 cable turns 1×2.5 mm with an outer diameter of 400 mm, an inner diameter of 30 mm, and an inductance of 373 μH.

REFERENCES

1. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Smirnov I.G., Khort D.O. Aktual'nyye problemy sozdaniya novykh mashin dlya promyshlennogo sadovodstva [Current problems of designing new machines for industrial gardening]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2013. 3. 20-23. (In Russian).
2. Kutyrev A.I., Khort D.O., Filippov R.A., Tsench Yu.S. Magnitno-impul'snaya obrabotka semyan zemlyaniki sadovoy [Magnetic pulse treatment of garden strawberry seeds]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2017. 3. 29-34. (In Russian).
3. Esitken A., Turan M. Alternating magnetic field effects on yield and plant nutrient element composition of strawberry (*Fragaria x ananassa* cv. Camarosa). *Acta Agric. Scand*. 2004. 54(3). 135-139. (In English).
4. Kulikov I.M., Donetskikh V.I., Upadyshev M.T. Magnitno-impul'snaya obrabotka rasteniy kak perspektivnyy priyem v tekhnologicheskikh protsessakh sadovodstva [Magnetic pulse treatment of plants as a promising method used in technological processes in horticulture]. *Sadovodstvo i vinogradarstvo*. 2015. 4. 45-52. (In Russian).
5. Galland P., Pazur A. Magnetoreception in plants. *International Journal of Plant Research*. 2005. 118(6). 371-389. (In English).
6. Carbonell M.V., Martinez E., Florez M. Biological effects of stationary magnetic field in thistle (*Cynara cardunculus*, L.). *Zemes ukio inzinerija*. 1998. Vol. 30. 2. 71-80. (In English).
7. Kutyrov A.I., Khort D.O., Filippov R.A., Smirnov I.G., Vershinin R.V. Sistema avtomatizirovannogo upravleniya parametrami agregata magnitno-impul'snoy obrabotki rasteniy v sadovodstve [System of automated controlling the parameters of a magnetic pulse unit used for plant treatment in horticulture]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12. 1. 16-21. (In Russian).
8. Kutyrov A.I., Khort D.O., Filippov R.A. Obosnovaniye parametrov apparata dlya magnitno-impul'snoy obrabotki rasteniy [Determination of the parameters of a unit for magnetic pulse treatment of plants]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2018. Vol. 1. 41. 32-38. (In Russian).
9. Khort D.O., Filippov R.A., Kutyrov A.I. Modelirovaniye i analiz konstruktssii tekhnologicheskogo adaptera dlya magnitno-impul'snoy obrabotki rasteniy v sadovodstve [Modelling and design analysis of a technological adapter for magnetic pulse treatment of plants in horticulture]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2017. 3. 29-34. (In Russian).
10. Brik V.S., Tsymbal A.A., Shagin G.A. Osnovnyye razmerno-vesovyye kharakteristiki zemlyaniki [Main size and weight characteristics of strawberries]. *Plodovodstvo i yagodovodstvo nechernozemnoy polosy*. 1973. Issue VIII. 133-140. (In Russian).
11. Khort D.O., Filippov R.A., Kutyrov A.I. Roboto-tekhnicheskoye sredstvo s modulem magnitno-impul'snoy obrabotki rasteniy v sadovodstve [Robotic tool with a magnetic-pulse unit for plant treatment in horticulture]. *Mekhatronika, avtomatika i robototekhnika*. 2017. 1. 28-30. (In Russian).
12. Dospekhov V.A. Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoy obrabotki rezul'tatov issledovaniy) [Field experiment methodology (with basics of statistical processing of research results)]. Moscow. Kolos. 1985. 336. (In Russian).

**The paper was submitted
to the Editorial Office on 14.09.2018**

**The paper was accepted
for publication on 18.10.2018**

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

Обоснование конструктивных параметров горизонтального роторного агрегата для дробления фуражного зерна

Анатолий Тимофеевич Лебедев,
доктор технических наук, профессор кафедры,
e-mail: lebedev.1962@mail.ru;

Рамиль Рашидович Искендеров,
кандидат технических наук;
Александр Сергеевич Шумский,
аспирант

Ставропольский государственный аграрный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация

Реферат. Горизонтальная роторная дробилка позволяет качественно измельчать зерновые материалы и получать готовый продукт, выравненный по гранулометрическому составу до 98 процентов. Эффективность работы дробилки определяют следующие параметры: частота вращения ротора, рабочий зазор, интенсивность и плотность заполнения дробильной камеры, длительность воздействия на исходный продукт, конструктивные особенности рабочих органов и геометрическое исполнение их рифленых поверхностей. (*Цель исследования*) Обосновать конструктивные параметры горизонтальной роторной дробилки фуражного зерна. (*Материалы и методы*) Исследовали влияние количества рифлей статора на качество измельченного продукта по трем показателям: степень измельчения, модуль помола, фактическая результативность процесса измельчения. Выявили, что при увеличении количества рифлей модуль помола и степень измельчения меняются незначительно, а фактическая результативность измельчения снижается. При этом готовый продукт соответствует грубому помолу. Провели сравнительный эксперимент двух конструктивных вариантов исполнения рабочих поверхностей при одном противорезе статора для проверки эффективности изменения формы рифлей ротора и статора. (*Результаты и обсуждение*) Определили, что геометрические параметры рифлей рабочих органов горизонтальной роторной дробилки можно вычислить, используя предложенную модель теоретического расчета, исходя из вида измельчаемого материала и зоотехнических требований. Придание угловой формы пазам ротора также оказывает положительное влияние на общие показатели процесса измельчения. (*Выводы*) Представили теоретическое обоснование конструктивных особенностей нарезки рифлей рабочих поверхностей горизонтальной роторной дробилки и расчет диаметра ротора. Предложили модель определения этих параметров исходя из вида измельчаемой зерновой культуры. Провели экспериментальное сравнение различных форм исполнения и количества противорезов статора относительно качества получаемой продукции. Основные параметры изготовления пазов ротора рассчитали для наиболее распространенных зерновых культур (пшеница, ячмень, овес, кукуруза) и теоретически обосновали их оптимальные значения.

Ключевые слова: роторная дробилка, измельчение зерновых материалов, рифленая рабочая поверхность, ротор, статор.

■ **Для цитирования:** Лебедев А.Т., Искендеров Р.Р., Шумский А.С. Обоснование конструктивных параметров горизонтального роторного агрегата для дробления фуражного зерна // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №5. С. 9-13. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-9-13.

Determination of Design Parameters for Horizontal Rotary Crushers for Feed Grain

Anatoly T. Lebedev,
Dr.Sc.(Eng.), professor,
e-mail: lebedev.1962@mail.ru;

Ramil R. Iskenderov,
Ph.D.(Eng.);
Aleksandr S. Shumsky,
postgraduate student

Stavropol State Agrarian University, Stavropol, Russian Federation

Abstract. A horizontal impact crusher provides for high-quality grinding of grain materials and getting the finished product equalized by particle size distribution to 98 percent. The effectiveness of the crusher is determined by the following parameters: rotor speed, operating clearance, intensity and full filling of the crushing chamber, the duration of impact on the original product, the design features of the working bodies and the geometric design of their corrugated surfaces. (Research

purpose) To determine the design parameters of a horizontal rotary crusher for feed grains. (Materials and methods) The influence of the stator flute number on the quality of the crushed product has been studied by three indicators: the grinding degree, the grinding module, the actual effectiveness of the grinding process. It has been found that as the flute number increases, the grinding module and the degree of grinding change insignificantly, and the actual effectiveness of grinding decreases. In this case, the finished product corresponds to coarse grinding. A comparative experiment has been conducted with two design variants of the working surfaces with one stator contradiction to check the effectiveness of changing the shape of the rotor and stator flutes. (Results and discussion) It has been determined that the geometrical parameters of flute working elements of a horizontal rotary crusher can be calculated using the proposed model of theoretical calculation based on the type of material crushed and zootechnic requirements. An angular shape of the rotor grooves also has a positive effect on the overall performance of the grinding process. (Conclusions) The authors present theoretical substantiation of the design features of cutting flute working surfaces of a horizontal rotary crusher and the calculation of the rotor diameter. They have proposed a model for calculating these parameters basing on the type of crushed grain crops. They have experimentally compared various design forms and the number of stator contradictions with respect to the quality of the products obtained. The main manufacturing parameters of rotor grooves have been calculated for the most common grain crops (wheat, barley, oats, and corn) and their optimal values have been theoretically substantiated.

Keywords: impact crusher, grinding of grain materials, corrugated working surface, rotor, stator.

■ **For citation:** Lebedev A.T., Iskanderov R.R., Shumsky A.S. Determination of the design parameters for horizontal rotary crusher for feed grain. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. 12(5). 9-13. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-9-13. (In Russian).

Эффективность работы измельчителя оценивают по производительности, качеству измельчения, удельной энергоёмкости и материалоемкости. Эти показатели в значительной мере обусловлены конструктивно-режимными параметрами дробилки [1-4].

Горизонтальная роторная дробилка позволяет качественно измельчать зерновые материалы и получать готовый продукт, выравненный по гранулометрическому составу до 98%, с минимальным количеством 1-3% пылевидных фракций [5-7].

В ней используются принципы разрушения исходных материалов, заложенные в конструкциях молотковых, центробежно-роторных и вальцовых измельчителей. К основным параметрам, характеризующим эффективность ее работы, относят: частоту вращения ротора, рабочий зазор, интенсивность и плотность заполнения дробильной камеры, длительность воздействия на исходный продукт, конструктивные особенности рабочих органов и геометрическое исполнение их рифленых поверхностей.

Вид, количество, взаимная ориентация, острота, ресурс и другие параметры рифлей ротора и статора горизонтальной роторной дробилки оказывают ключевое влияние на качественную сторону измельчения, которая в современном кормопроизводстве определяет итоговую эффективность этого технологического процесса.

Цель исследования – обосновать конструктивные параметры горизонтальной роторной дробилки фуражного зерна.

Материалы и методы. В соответствии с методикой повышения эффективности технологических

процессов и средств механизации горизонтальная роторная дробилка для переработки зерновых материалов представлена самостоятельной сложной технической системой [8-10]. Процесс измельчения зерновых материалов относится к одному из наиболее распространенных на практике ключевому процессу – разделению материалов на части. Поэтому целевым назначением рабочих поверхностей стало создание условий разделения исходных зерновок на заданное количество частиц до достижения ими необходимого модуля помола и степени измельчения зернофуража в соответствии с зоотехническими требованиями. Рабочие поверхности остальных деталей корпуса в меньшей степени оказывают влияние на результативность процесса.

Рассматривая рифленые поверхности ротора и статора можно сказать, что пазы ротора больше влияют на процесс измельчения. Они обеспечивают доставку продукта в зону разрушения и создают условия захвата зерновок и необходимое напряжение в зоне контакта с противорезами статора для их скола. Поэтому форма рифлей статора должна выполняться идентично геометрическим параметрам рифлей ротора, не нарушая схемы взаимодействия «острие по острию» [6].

В ходе поисковых экспериментов на зернах пшеницы грубого помола ($M = 1,5-3$ мм) исследовано влияние количества противорезов (рифлей) статора $n_{п.с}$ на качество измельченного продукта по трем показателям: степени измельчения λ , модулю помола M и фактической результативности процесса измельчения $\Phi_{ри}$ при рабочем зазоре 0,8 мм и при частоте вращения ротора 1400 мин⁻¹ (рис. 1).

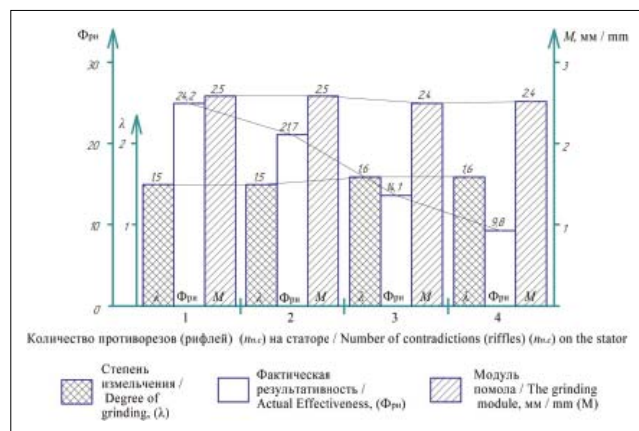


Рис. 1. Зависимость качественных показателей процесса измельчения от количества рифлей $n_{п.с}$ на статоре

Fig. 1. Dependence of the qualitative indices of the grinding process on the number of ruffles $n_{п.с}$ on the stator

Исследования показали, что при увеличении количества рифлей модуль помола M и степень измельчения λ меняются незначительно, а фактическая результативность измельчения $\Phi_{ри}$ снижается с 24,2 до 9,8. По этим трем оценочным показателям готовый продукт соответствует грубому помолу, но при этом предложенный показатель $\Phi_{ри}$ чувствительнее при изменении выравненности размера частиц в измельченной массе зерна. Данный опыт подтвердил возможность разделения исходного продукта на части при одном противорезе на статоре для среднего и грубого помола. При тонком помоле рекомендовано увеличить количество рифлей статора в пределах $n_{п.с} = 3-4$.

Для проверки эффективности изменения формы рифлей ротора и статора провели сравнительный эксперимент двух конструктивных вариантов исполнения рабочих поверхностей при одном противорезе статора (рис. 2).

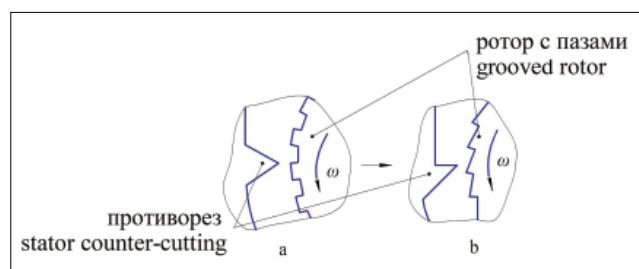


Рис. 2. Схема выполнения уклона: а – противореза статора, б – пазов ротора

Fig. 2. Scheme of the gradient: а – the stator counter-cutting element, б – rotor slots

Наибольшее количество фракций, соответствующих зоотехническим требованиям, получено в варианте с уклоном пазов ротора, что характеризуется изменением показателей степени измельчения с 1,6 до 1,5, модуля помола – с 2,4 до 2,5 мм и

фактической результативности процесса измельчения – с 16,9 до 36.

Для теоретического обоснования такого профиля рифлей ротора определим расстояние (шаг) t между двумя вершинами рифлей и их высоту h , измеряемую по радиусу. Поскольку искомые показатели зависят от геометрических параметров зернового материала, руководствовались эквивалентным диаметром исходного продукта D_3 и значением рабочего зазора δ . Величину площадки ΔS и радиус закругления ΔR рифлей, как трудноконтролируемые и не заданные правилами, не учитывали (рис. 3).

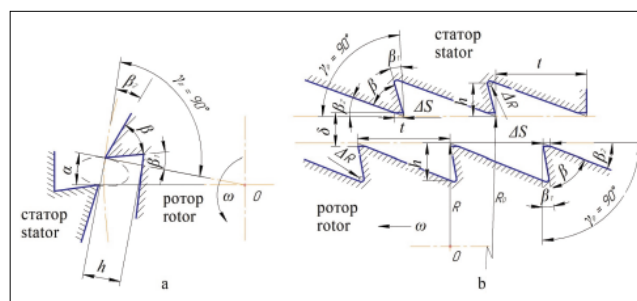


Рис. 3. Схема нарезки рифлей ротора и статора: а – при сколе зерновки в поперечном срезе, б – в развернутом виде

Fig. 3. Scheme of cutting grooves of the rotor and the stator: а – with caryopsis cleavage in a cross-section, б – in an unfolded state

Из рисунка 3 видно, что рифли горизонтальной роторной дробилки имеют две неравные боковые грани острия – узкую и широкую. Если из центра ротора провести радиус к вершине рифли, то можно увидеть, что угол острия β , угол наклона стенки паза β_1 и угол наклона спинки паза β_2 образуют угол резания $\gamma_p = 90^\circ$. При этом профиль рифли противореза позволяет дополнительно контролировать размер получаемых частиц готового зернового продукта. Например, за счет сужения канала между режущими поверхностями вблизи разгрузочного окна.

В принятой схеме выполнения падов под уклоном шаг фактически равен ширине паза a_n , то есть $t \approx a_n$. Тогда, исходя из геометрии зерновок различных культур, можно записать $t \approx 2D_3$, где D_3 – эквивалентный диаметр зерновки [2, 11].

Используя шаг нарезки рифлей t , можно узнать количество рифлей (падов) ротора n_n :

$$n_n = \pi R / D_3. \quad (1)$$

Далее определим высоту рифлей h для падов ротора с учетом ее влияния на размер готового продукта:

$$h = t \sin 2\beta_1 / 2\lambda, \quad (2)$$

где λ – требуемая степень измельчения:

$$\lambda = D_3 / M, \quad (3)$$

Таблица					Table
КОНСТРУКТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ РОТОРНОЙ ДРОБИЛКИ DESIGN PARAMETERS OF THE HORIZONTAL ROTOR CRUSHER					
Измельчаемая культура / Показатель Grindable crop / Indicator	D_3 , мм mm	D_{min} , мм mm	t , мм mm	h , мм mm	n , шт. pcs
Пшеница / Wheat	3,8	62	7,6	1,4	26
Ячмень / Barley	4,2	75	8,4	1,5	25
Овес / Oats	3,7	80	7,4	1,3	34
Кукуруза / Corn	6,9	110	13,8	1,7	25

где M – заданный модуль помола, мм.

На примере расчета вальцовых дробилок, зная значение зазора δ и размер исходной частицы зернового материала D_3 , можно вычислить диаметр ротора горизонтальной дробилки [2]:

$$D_{min} = D_3 - \delta / (1 - \cos \alpha), \quad (4)$$

где D_{min} – минимальный теоретический диаметр ротора горизонтальной дробилки, мм; α – угол заклинивания зерновки между режущей кромкой противореза статора и паза ротора, зависящий от радиуса ротора и размера зерновки, град.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Используя предложенную модель теоретического расчета геометрических параметров рифлей рабочих органов горизонтальной роторной дробилки, можно вычислить их с учетом вида измельчаемого материала и зоотехнических требований. Например, при измельчении пшеницы, эквивалентный диаметр которой равен $D_3 = 3,8$ мм, до соответствия ее измельченных частиц среднему модулю помола ($M = 1,2-1,8$) с минимальным рабочим зазором δ (0,1 мм) и значением углов наклона стенки и спинки паза $\beta_1, \beta_2 = 15^\circ$, а также острия $\beta = 60^\circ$; получим: $t = 7,6$ мм, $h = 1,2$ мм, $D_{min} = 62$ мм и $n = 26$ шт. [2].

В таблицу 1 внесены соответствующие параметры для других зерновых культур (ячмень, овес, кукуруза).

При измельчении в горизонтальной роторной дробилке всех четырех видов фуражного зерна можно рекомендовать $D = 100$ мм.

Рабочие поверхности (рифли) ротора и статора изготавливают с учетом геометрических параметров измельчаемого материала. Угловая форма пазов ротора положительно сказывается на общих показателях процесса измельчения. Предложенная теоретическая модель расчета основных конструктивных параметров профиля рифлей ротора позволяет определить шаг, высоту и количество пазов ротора в соответствии с видом измельчаемой зерновой культуры.

Выводы. Дальнейшее исследование и выявление наиболее оптимальных конструктивных параметров поверхностей рабочих органов измельчителей фуражного зерна, в том числе и с точки зрения их ресурса, позволит получить высокое качество готовой продукции, снизить энергоемкость процесса и производить высокотехнологичные измельчающие агрегаты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Драгилев А.И., Дроздов В.С. Технологическое оборудование предприятий перерабатывающих отраслей. М.: Колос. 2001. 352 с.
2. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм. Л.: Колос. 1978. 560 с.
3. Искендеров Р.Р., Очинский В.В., Лебедев А.Т. Измельчение зерновых материалов: проблемы и способы их решения. Ставрополь. 2015. С. 19-22.
4. Сыроватка В.И. Машинные технологии приготовления комбикормов в хозяйствах. М.: ВНИИМЖ. 2010. 248 с.
5. Лачуга А.Ф., Горбачев И.В., Ежевский А.А., Измаилов А.Ю., Елизаров В.П., Артюшин А.А., Лобачевский Я.П., Кряжков В.М., Антышев Н.М., Бабченко В.Д., Бейлис В.М., Голубкович А.В., Гришин А.П., Евтюшенков Н.Е., Жалнин Э.В., Жук А.Ф., Колесникова В.А., Левина Н.С., Личман Г.И., Марченко Н.М. Система машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства на период до 2020 года. М.: ВИЭСХ. Т. 2. 304 с.
6. Барабашкин В.П. Молотковые и роторные дробилки (конструкция, расчет, монтаж и эксплуатация). М.: Стройиздат. 1963. 132 с.
7. Лебедев А.Т., Искендеров Р.Р., Шумский А.С. Влияние рабочего зазора на эффективность процесса измельчения зерновых материалов в горизонтальной роторной дробилке // Наука в центральной России. 2017. N5(29). С. 36-43.
8. Искендеров Р.Р., Очинский В.В., Лебедев А.Т., Павлюк Р.В. Элементы проектирования роторной дробилки // Научная жизнь. 2014. N6. С. 42-49.
9. Лебедев А.Т. Ресурсосберегающие направления повышения надежности и эффективности технологических процессов в АПК. Ставрополь: Агрус. 2012. 376 с.
10. Измаилов А.Ю., Лобачевский Я.П., Марченко О.С., Ценч Ю.С. Создание инновационной техники и ресур-

собирающих технологий производства кормов – основа развития животноводства // Вестник МГАУ им. В.П. Горячкина. 2017. №6 (82). С. 23-26.

11. Искендеров Р.Р., Очинский В.В., Лебедев А.Т., Пав-

люк Р.В. Методологический подход к обоснованию принципа работы роторной дробилки /// Вестник МГАУ им. В.П. Горячкина. 2015. №3(67). С. 24-28.

REFERENCES

1. Dragilev A.I., Drozdov B.C. Tekhnologicheskoye oborudovaniye predpriyatiy pererabatyvayushchikh otrasley [Technological equipment of enterprises of processing industries]. Moscow. Kolos. 2001. 352. (In Russian).

2. Mel'nikov S.V. Mekhanizatsiya i avtomatizatsiya zhivotnovodcheskikh ferm [Mechanization and automation of livestock farms]. Leningrad. Kolos. 1978. 560. (In Russian).

3. Iskenderov R.R., Ochinskiy V.V., Lebedev A.T. Izmel'cheniye zernovykh materialov: problemy i sposoby ikh resheniya [Grinding of grain materials: problems and ways of their solving]. Stavropol'. 2015. 19-22. (In Russian).

4. Syrovatka V.I. Mashinnyye tekhnologii prigotovleniya kombikormov v khozyaystvakh [Machine technology for animal feed preparation on farms]. Moscow. VNIIMZH. 2010. 248. (In Russian).

5. Lachuga A.F., Gorbachev I.V., Yezhevskiy A.A., Izmaylov A.Yu., Yelizarov V.P., Artyushin A.A., Lobachevskiy Ya.P., Kryazhkov V.M., Antyshev N.M., Babchenko V.D., Beylis V.M., Golubkovich A.V., Grishin A.P., Yevtyushenkov N.Ye., Zhalnin E.V., Zhuk A.F., Kolesnikova V.A., Levina N.S., Lichman G.I., Marchenko N.M. Sistema mashin i tekhnologiy dlya kompleksnoy mekhanizatsii i avtomatizatsii sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva na period do 2020 goda [The system of machines and technologies for the integrated mechanization and automation of agricultural production for the period up to 2020]. M.: VIESKH. Vol. 2. 304. (In Russian).

6. Barabashkin V.P. Molotkovyye i rotornyye dробилки (konstruktsiya, raschet, montazh i ekspluatatsiya) [Hammer and impact crushers (design, calculation, installation and

operation)]. Moscow. Stroyizdat. 1963. 132. (In Russian).

7. Lebedev A.T., Iskenderov R.R., Shumskiy A.S. Vliyaniye rabochego zazora na effektivnost' protsessa izmel'cheniya zernovykh materialov v gorizontallyy rotornoy dробилке [The influence of the operating clearance on the efficiency of a grinding process of grain materials in a horizontal rotary crusher]. *Nauka v tsentral'noy Rossii*. 2017. 5(29). 36-43. (In Russian).

8. Iskenderov R.R., Ochinskiy V.V., Lebedev A.T., Pavlyuk R.V. Elementy proyektirovaniya rotornoy dробилки [Design elements of a rotary crusher]. *Nauchnaya zhizn'*. 2014. 6. 42-49. (In Russian).

9. Lebedev A.T. Resursosberegayushchiye napravleniya povysheniya nadezhnosti i effektivnosti tekhnologicheskikh protsessov v APK [Resource-saving areas of increasing the reliability and efficiency of technological processes in the farm industry]. Stavropol': Agrus. 2012: 376. (in Russian)

10. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P., Marchenko O.S., Tsench Yu.S. Sozdaniye innovatsionnoy tekhniki i resursosberegayushchikh tekhnologiy proizvodstva kormov – osnova razvitiya zhivotnovodstva [Developing innovative technology and resource-saving technologies for the production of feed as the basis for livestock breeding development]. *Vestnik MGAU im. V.P. Goryachkina*. 2017. 6(82): 23-26. (In Russian).

11. Iskenderov R.R., Ochinskiy V.V., Lebedev A.T., Pavlyuk R.V. Metodologicheskiy podkhod k obosnovaniyu printsipa raboty rotornoy dробилки [Methodological approach to determining the operating principle of a rotary crusher]. *Vestnik MGAU im. V.P. Goryachkina*. 2015. 3(67). 24-28. (In Russian).

Статья поступила в редакцию 03.04.2018

The paper was submitted

to the Editorial Office on 03.04.2018

Статья принята к публикации 25.05.2018

The paper was accepted

for publication on 25.05.2018

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Результаты исследований технологического процесса картофелекопателя

Виктор Михайлович Алакин,
кандидат технических наук, доцент кафедры,
e-mail: alakin@bmstu-kaluga.ru;

Геннадий Сергеевич Никитин,
аспирант кафедры

Калужский филиал Московского государственного университета им. Н.Э Баумана, Калуга, Российская Федерация

Реферат. Картофелекопатель, оснащенный четырехлопастным битером в комплексе с ротационной сепарирующей поверхностью, обладает низкой материалоемкостью и энергоемкостью, более высокой сепарирующей способностью, а также меньше травмирует клубни. Однако во избежание нарушения процесса транспортирования картофелесодержащего пласта перед первой роторной секцией в конструкции данного картофелекопателя необходимо использовать четырехлопастной приемно-подающий битер. *(Цель исследования)* Повысить технологическую и экономическую эффективность подкапывающе-сепарирующего устройства картофелекопателя ротационного типа благодаря оптимизации параметров конструкции и режимов работы приемно-подающего битера. *(Материалы и методы)* Рассмотрели основные принципы устойчивости межоперационного процесса транспортирования картофелесодержащего вороха четырехлопастным приемно-подающим битером. Для исключения вероятности перегрузки битера при приеме и перемещении картофелесодержащего пласта вычислили зависимость его минимальной угловой скорости от скорости движения картофелекопателя. Проанализировали процесс подъема картофельного вороха на вершины рабочих органов первой секции ротационного сепаратора и создали методику получения значений скорости и угла отрыва материала от лопасти битера. Рассчитали рабочую угловую скорость битера с помощью дифференциального уравнения, описывающего движение картофелесодержащего пласта по поверхности лопасти. *(Результаты и обсуждение)* Показали, как с помощью уравнений динамики, описывающих движение тела, брошенного под углом к горизонту, определить предварительные скорость и угол отрыва картофелесодержащего пласта от лопасти битера. Их реальные значения находятся в зависимости от скорости движения картофелекопателя и определяются из треугольника скоростей. Составили зависимость рабочей угловой скорости вращения четырехлопастного битера от скорости движения картофелекопателя. Ее величина должна превышать значения минимальной угловой скорости. *(Выводы)* Теоретические расчеты позволили вычислить наиболее оптимальные конструктивные параметры и режимы работы четырехлопастного битера, обеспечивающие устойчивые процессы приема, перемещения и передачи пласта на ротационную сепарирующую поверхность.

Ключевые слова: картофель, картофелекопатель, уборка, картофелесодержащий ворох, ротационная сепарирующая поверхность, роторно-зубчатые рабочие органы, лемех, лопастной битер, производительность, надежность, энергоемкость, материалоемкость.

■ **Для цитирования:** Алакин В.М., Никитин Г.С. Результаты исследований технологического процесса картофелекопателя // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №5. С. 14-19. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-14-19.

Research Results of the Potato Digger Technological Process

Viktor M. Alakin,
Ph.D.(Eng.), associate professor,
e-mail: alakin@bmstu-kaluga.ru;

Gennadiy S. Nikitin,
postgraduate student

Kaluga Branch of Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, Russian Federation

Abstract. A potato digger equipped with a four-bladed beater operating in connection with rotary separating surface has low material and energy consumption, higher separating efficiency, as well as lower degree of tuber damaging. The potato digger design should include a four-bladed intake-and-feed beater to prevent potato heap transportation faults in front

of the first section. (Research purpose) Increasing the technological and economic efficiency of a potato digging-and-separating unit through the determination of the optimum values of the design parameters and operating process of the intake-and-feed beater. (Materials and methods) the authors have made an overview of general principles of ensuring the stability of the potato heap movement provided by the four-bladed intake-and-feed beater. The dependency of the minimum beater speed on the operating speed of the potato digger has been found to exclude a probability of its overloading. The methodology of calculating the potato heap velocity and the cutoff angle between the material and the beater blades has been worked out by analyzing potato heap lifting to the upper points of the working units of the rotary separator's first section. Operating speed of the beater has been determined through the differential equation for the speed of a potato heap moving along the blade surface. (Results and discussion) Preliminary potato heap speed and cutoff angle have been found through the equation of dynamics describing the projectile motion of an object thrown at an angle. The operating values of the angles are dependent on the potato digger working speed and can be selected from the triangle of speeds. The authors have determined the dependence of the optimal beater speed on the working speed of a potato digger. Its value should exceed the minimum speed of the beater. (Conclusions) Theoretical results allow proposing the best design features and optimum working process parameters of a four-bladed beater receiving a potato heap, transporting it and lifting on the rotary separating surface.

Keywords: potato, potato digger, harvesting, potato heap, rotary separating surface, rotary star wheels, share, four-bladed beater, performance, reliability, energy efficiency, material consumption.

For citation: Alakin V.M., Nikitin G.S. Research results of the potato digger technological process. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. 12(5). 14-19. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-14-19. (In Russian).

В настоящее время на возделывание картофеля приходится значительная доля мирового сельскохозяйственного производства. Согласно официальной статистике Министерства сельского хозяйства Российской Федерации, только в нашей стране под его посадками занято свыше 297,11 тыс. га. Как и при производстве большинства овощных культур, значительная часть всех трудозатрат при возделывании картофеля до сих пор приходится на уборку урожая (до 30-40%). В настоящее время для этой цели в основном используют картофелекопатели, картофелекопатели-валкоукладчики, картофелекопатели-погрузчики и картофелеуборочные комбайны. Первые два типа наиболее широко распространены в небольших фермерских и личных подсобных хозяйствах. Картофелекопатели-погрузчики и картофелеуборочные комбайны чаще всего используют при промышленных объемах производства, в том числе в комплексе с картофелекопателями и картофелекопателями-валкоукладчиками при уборке урожая по двухфазной технологии [1-5].

В качестве основного сепарирующего устройства во всех четырех типах картофелеуборочных машин в большинстве случаев используют прутковый элеватор. К его главным достоинствам можно отнести простоту конструкции, универсальность применения и возможность транспортирования убираемой продукции под углом до 25°. Однако из-за низкой сепарирующей способности, значительной металлоемкости, энергоемкости, а также подверженности износу и залипанию почвой (при работе

на полях с влажностью более 22%) существенно снижаются его технологические характеристики, что негативно отражается на работе картофелеуборочной машины в целом [1].

Для решения данной проблемы в Калужском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана был разработан ротационный сепаратор новой конструкции. Его рабочая поверхность образована пятью или шестью ротационными секциями, состоящими из валов с установленными на них роторно-зубчатыми рабочими органами. Между роторами располагаются винтовые распорно-регулируемые втулки, с помощью которых рабочие органы смещаются вдоль валов, и между ними образуется сепарирующий зазор S . В зависимости от размера мелкой фракции картофеля его можно устанавливать в пределах 30-50 мм. Это дает возможность универсального применения сепаратора и в целом копателя для уборки других корнеклубнеплодов.

Роторно-зубчатые рабочие органы соседних рядов должны иметь возможность свободно перемещаться вдоль валов без зацепления, поэтому рабочие секции установлены с некоторым технологическим зазором S . Рабочий орган ротационного сепаратора представляет собой ротор с восемью наклонными пальцами зубчатой формы. Для достижения необходимой упругости толщина зубчатых пальцев увеличивается от вершины к основанию, а за счет их наклонной и сферической поверхности уменьшается вероятность наматывания растительных примесей, защемления комков почвы и клубней, что существенно снижает сопротивление се-

парирующей поверхности и повреждаемость клубней. Вращательное движение роторно-зубчатых рабочих органов позволяет более интенсивно крошить и равномерно распределять транспортируемые гряды по ширине сепаратора, тем самым повышая интенсивность просеивания почвенных примесей и уменьшая повреждаемость убираемой культуры [6, 7]. Внешний диаметр зубчато-пальцевых роторов составляет 300 мм, что обеспечивает им высокую окружную скорость при низкой частоте вращения валов, а также большую площадь живого сечения. В качестве материала для ротационных рабочих органов используют высокопрочную резину марки 18-510 Тульского завода РТИ. За счет высокой прочности роторов и устранения зацепления пальцев между собой значительно увеличился срок службы сепаратора, а его материал- и энергоёмкость снизились [8, 9].

Для проведения экспериментальных исследований ротационный сепаратор установили на раму прицепного картофелекопателя КСТ-1,4А. Разработку конструкции универсального ротационного картофелекопателя полностью проводили в CAD-системах *Solidworks* и КОМПАС-3D. Это не только снизило время проектирования, но и позволило провести предварительный кинематический и динамический анализ различных элементов конструкции и рабочего процесса. Он показал, что из-за увеличенного (относительно известных аналогов) внешнего диаметра рабочих органов возникает значительный перепад высот между ними и задними кромками лемехов. Поэтому в этом месте будет происходить замедление процесса транспортирования пласта, что соответственно приведет к росту повреждений клубней в зоне контакта с первой роторной секцией и, как следствие, к нарушению работы картофелекопателя в целом [7-9].

Одним из вариантов устранения данного недостатка, а также повышения технологической эффективности сепаратора, стала установка четырехлопастного битера между лемехами и первой ротационной секцией сепарирующей поверхности. Ранее данные устройства применяли в основном в комплекте с сепараторами пруткового типа. Примером могут служить картофелекопатели КСТ-1,4М, КТН-2ВМ, где битер использовался для первичного разрушения структуры подкопанного пласта и его равномерного распределения по ширине элеватора. Так как ротационный сепаратор обладает более высокой просеивающей способностью, главной задачей битера становится обеспечение устойчивой подачи пласта на вершины рабочих органов первой секции.

Цель исследования – повышение технологической и экономической эффективности подкапывающе-сепарирующего устройства картофелекопа-

теля ротационного типа путем оптимизации параметров конструкции и режимов работы приемно-подающего битера, обеспечивающей устойчивость межоперационного процесса транспортирования клубненосного пласта, а также повышение сохранности урожая и производительности картофелеуборочной машины в целом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. В качестве исследуемого объекта была предложена конструкция четырехлопастного битера, рабочую основу которого составляют металлические пластины, резинотканевые лопасти и отражающие щитки, установленные на кронштейнах квадратного вала. Посредством продольных пазов в кронштейнах пластины, лопасти и щитки смещаются от крайнего положения на величину до 70 мм.

Для устойчивой работы битера главное – обеспечить устойчивость приема и перехода картофельного пласта на сепаратор, а также избежать его перегрузки при любых условиях и режимах работы картофелекопателя. Для этого определим зависимость минимальной угловой скорости вращения битера $\omega_{\min}$ от скорости движения картофелекопателя V_k .

Скорость поступления материала на битер V_r найдем по формуле, предложенной В.П. Горячкиным [10]:

$$V_r = V_k \frac{\sin \psi_b}{\sin(\gamma_n + \psi_b)}, \quad (1)$$

где V_k – скорость движения картофелекопателя, м/с;
 ψ_b – угол уплотнения пласта, град;
 γ_n – угол наклона лемеха, град.

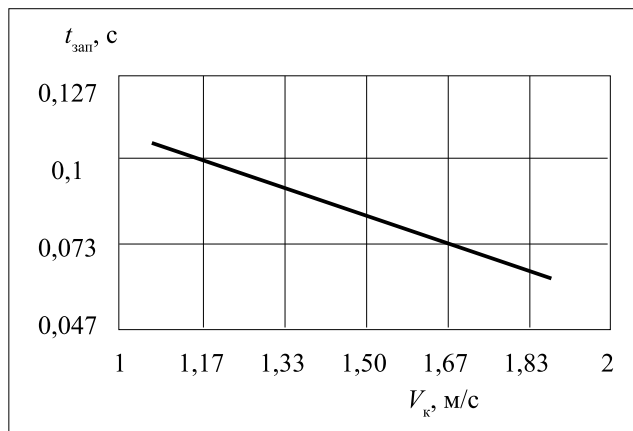


Рис. 1. График зависимости времени заполнения битера $t_{\text{зап}}$ от скорости движения картофелекопателя V_k

Fig. 1. The dependency diagram of the time of filling beater $t_{\text{зап}}$ on the potato digger working speed V_k

Принимая радиус битера R_b равным радиусу роторно-зубчатого рабочего органа R_p , размер щитка минимальным $R_{\text{щ}} = 0,1$ м, а угол поворота (при котором происходит заполнение лопасти) равным

45°, можно найти зависимости времени заполнения $t_{\text{зап}}$ и минимальной угловой скорости вращения ω_{min} от скорости движения картофелекопателя V_k (рис. 1, 2). Для выполнения первого условия устойчивой работы бitera должно соблюдаться неравенство $\omega_{\text{min}} \leq \omega_6$.

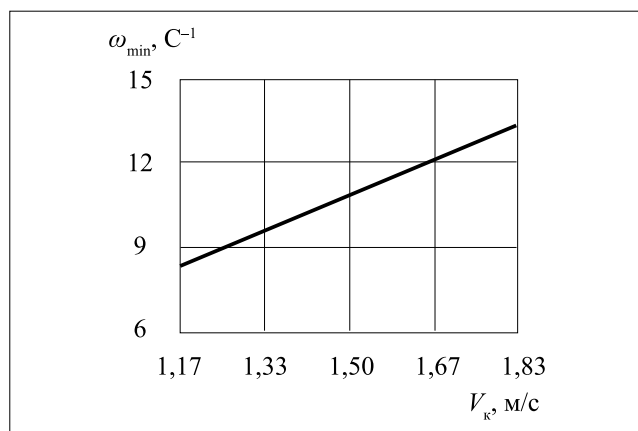


Рис. 2. График зависимости минимальной угловой скорости бitera ω_{min} от скорости движения картофелекопателя V_k
Fig. 2. The dependency diagram of the minimum angular velocity (speed) of the beater ω_{min} on the potato digger working speed V_k

Второе условие, определяющее характер работы бitera в комплексе с ротационной сепарирующей поверхностью, заключается в устойчивой подаче подкопанного пласта на вершины рабочих органов первой секции. Оно соответственно зависит от скорости V_c и угла β_c отрыва материала от лопасти, что можно регулировать изменением R_6 , $R_{\text{ш}}$, ω_6 .

Так как после схода с лопасти картофелесодержащего пласта на него действует только сила тяжести, то предварительные значения скорости V_0 и угла α_c отрыва материала от лопасти получают только на основе конструктивных параметров ротационной поверхности и бitera (без учета движения картофелекопателя). Воспользуемся формулами, описывающими движение тела, брошенного под углом к горизонту.

Горизонтальная дальность полета:

$$X = \frac{V_0^2}{g} \sin 2\alpha_c. \quad (2)$$

Наивысшая точка полета:

$$H = \frac{V_0^2}{2g} \sin^2 \alpha_c. \quad (3)$$

В процессе работы картофелекопателя бiter совершает сложное движение, которое включает в себя поступательный и вращательный компоненты, поэтому реальная скорость V_c и угол β_c отрыва материала от лопасти найдем с помощью треугольника скоростей (рис. 3).

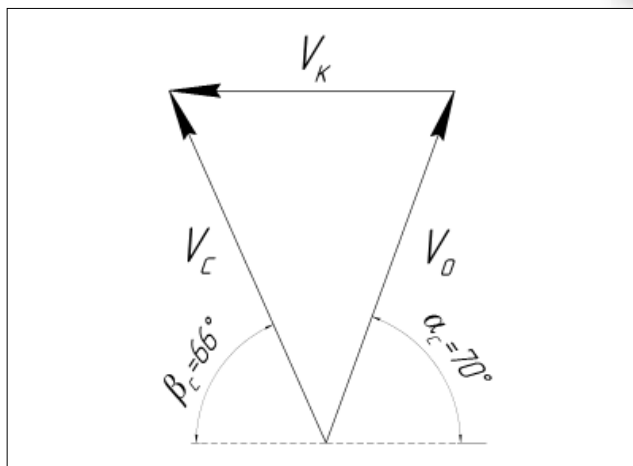


Рис. 3. Треугольник скоростей

Fig. 3. The triangle of speeds

Угловую скорость бitera ω_6 , отвечающую всем вышеперечисленным требованиям, определим из дифференциального уравнения (4), описывающего движение картофелесодержащего пласта по поверхности лопасти (рис. 4). Применяя инерционную систему координат с центром в середине приводного вала бitera и осями, параллельными его лопастям, необходимо учитывать возникающие центробежные $F_{\text{ц}}$ и Кориолисовы F_c силы инерции.

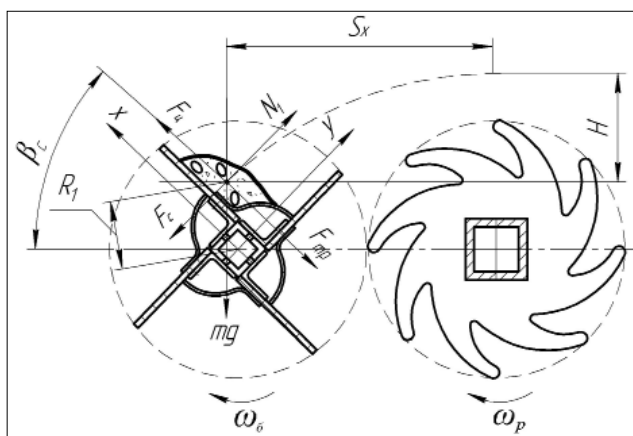


Рис. 4. Схема сил, действующих на картофелесодержащий пласт

Fig. 4. Force diagram showing all forces acting on a potato heap

Спроецируем все силы на оси x, y (рис. 4):

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_u - F_{mp} - mg \sin \beta_c \\ m\ddot{y} = N_1 - F_c - mg \cos \beta_c \end{cases}, \quad (4)$$

где m – масса части картофелесодержащего пласта, кг;

$\ddot{x}$ – ускорение картофелесодержащего пласта по оси x , м/с²;

$\ddot{y}$ – ускорение картофелесодержащего пласта по оси y , м/с²;

$F_{\text{ц}}$ – центробежная сила, Н;

$F_{\text{тр}}$ – сила трения скольжения, Н;

N_1 – сила реакции поверхности лопасти, Н;

F_c – сила Кориолиса, Н;

R_1 – расстояние от центра бitera до центра картофелесодержащего пласта, м.

Из первого уравнения системы (4) находим силу трения $F_{тр}$:

$$F_{мп} = fN_1 = f(2m\omega_6\dot{x} + mg \cos \beta_c), \quad (5)$$

где f – коэффициент трения скольжения почвы по резине, $f = 0,7$.

Выражая значение R_1 , через переменную x и подставляя в систему (4) центробежную силу $F_{ц}$, силу Кориолиса F_c , силу трения $F_{тр}$ и силу реакции поверхности лопасти N_1 , получаем выражение:

$$\ddot{x} + 2f\omega_6\dot{x} - \omega_6^2x = -fg \cos \omega_6t - g \sin \omega_6t, \quad (6)$$

где t – переменная времени, с.

Левая часть выражения (6) представлена однородным дифференциальным уравнением второго порядка, решение которого имеет вид:

$$X_1 = C_1e^{B_1t} + C_2e^{B_2t}, \quad (7)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования;

B_1 и B_2 – корни характеристического уравнения.

$$B_1 = 0,5\omega_6; \quad B_2 = -2\omega_6.$$

Правая часть выражения (6) представляет собой линейное неоднородное дифференциальное уравнение:

$$\ddot{x} = A \cos \omega_6t + B \sin \omega_6t, \quad (8)$$

где A , B – постоянные коэффициенты.

Через первое и второе производные уравнения (8) можно найти постоянные коэффициенты A , B :

$$A = \frac{fg}{\omega_6^2(1 + f^2)},$$

$$B = \frac{g(1 - f^2)}{2\omega_6^2(1 + f^2)}.$$

Общее решение линейного неоднородного дифференциального уравнения второго порядка будет иметь вид:

$$x = X_1 + \tilde{x} = C_1e^{B_1t} + C_2e^{B_2t} + A \cos \omega_6t + B \sin \omega_6t. \quad (9)$$

Первая производная уравнения (9):

$$\dot{x} = C_1B_1e^{B_1t} + C_2B_2e^{B_2t} - A\omega_6 \sin \omega_6t + B\omega_6 \cos \omega_6t. \quad (10)$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 находим, подставляя начальные условия $t(0) = 0$; $x(0) = R_{ш}$; $\dot{x}(0) = 0$ в формулы (9) и (10):

$$C_1 = \frac{B_2(A - R_{ш}) + B\omega_6}{B_1 - B_2},$$

$$C_2 = \frac{B_1(R_{ш} - A) + B\omega_6}{B_1 - B_2}.$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для уменьшения времени пребывания картофелесодержащего пласта на лопасти предпочтительнее использовать настильную траекторию его подъема на вершины роторно-зубчатых рабочих органов первой секции сепаратора. Подставляя в формулы (2) и (3) значения горизонтальной дальности $S_x = 0,16$ и наивысшей точки полета $H = 0,23$ м, определяем, что при наиболее оптимальном угле отрыва $\alpha_c = 70^\circ$ предварительная скорость схода материала V_0 должна равняться 2,2 м/с. Исходя из треугольника скоростей (рис. 3) найдем угол отрыва β_c и скорость отрыва V_c в зависимости от скорости движения картофелекопателя, таблица 1.

Таблица 1					Table 1		
ЗАВИСИМОСТИ УГЛА β_c И СКОРОСТИ V_c ОТРЫВА КАРТОФЕЛЕСОДЕРЖАЩЕГО ПЛАСТА ОТ СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ КАРТОФЕЛЕКОПАТЕЛЯ V_k DEPENDENCIES OF THE ANGLE β_c AND SPEED V_c OF THE POTATO HEAP CUTOFF ON THE POTATO DIGGER WORKING SPEED V_k							
V_k , м/с	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
β_c , град	80,5	78	75	72,5	70	67,5	65
V_c , м/с	2,09	2,11	2,13	2,16	2,20	2,23	2,26

Полученные уравнения (9) и (10) определяют положение и скорость движения транспортируемого материала на лопасти бitera. Они показывают, что минимальная скорость схода V_c будет в наивысшей точке отрыва, то есть при $\beta_c = 90^\circ$. В дальнейшем скорость V_c увеличивается вследствие уменьшения высоты точки отрыва. Подставляя значения R_6 , $R_{ш}$, V_k , V_c , β_c в данные выражения, получаем зависимость рабочей угловой скорости бitera ω_6 от скорости движения картофелекопателя V_k (табл. 2).

Таблица 2							Table 2
ЗАВИСИМОСТЬ ОПТИМАЛЬНОЙ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ БИТЕРА ω_6 ОТ СКОРОСТИ РАБОТЫ КАРТОФЕЛЕКОПАТЕЛЯ V_k THE DEPENDENCE OF THE OPTIMAL ANGULAR VELOCITY (SPEED) OF THE BEATER ω_6 ON THE POTATO DIGGER WORKING SPEED V_k							
V_k , м/с	1,1	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	
ω_6 , с ⁻¹	29	31	32	33,5	34,5	35,5	

Выводы

В результате проведенных исследований были определены наиболее оптимальные конструктивные параметры и режимы работы четырехлопастного бitera, обеспечивающие устойчивость межоперационного процесса транспортирования клубненосного пласта и предварительное разрушение его структуры, за счет чего существенно повысились технологические и экономические параметры картофелекопателя, оснащенного ротационным сепарирующим устройством.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Резников Л.А., Ещенко В.Т., Дьяченко Г.Н., Сокол Н.А. Основы проектирования и расчет сельскохозяйственных машин. М.: Агропромиздат. 1991. С. 428-446.
2. Турбин Б.Г., Лурье А.Б., Григорьев С.М., Иванович Э.М., Мельников С.В. Сельскохозяйственные машины. Теория и технологический расчет. Л.: Машиностроение. 1967. 583 с.
3. Туболев С.С., Шеломенцев С.И., Пшеченков К.А., Зейрук В.Н. Машинные технологии и техника для производства картофеля. М.: Агроспас. 2010. С. 176-188.
4. Кленин Н.И., Киселев С.Н., Левшин А.Г. Сельскохозяйственные машины. М.: КолосС, 2008. С. 655-670.
5. Халанский В.М., Горбачев И.В. Сельскохозяйственные машины. М.: КолосС. 2004. С. 422-431.
6. Лачуга Ю.Ф., Горбачев И.В., Ежевский А.А., Измайлов А.Ю., Кряжков В.М., Антышев Н.М., Бабченко В.Д., Бейлис В.М., Голубкович А.В., Гришин А.П., Евтюшенков Н.Е., Жалнин Э.В., Жук А.Ф., Колесникова В.А., Ле-

- вина Н.С., Личман Г.И., Марченко Н.М., Марченко Л.А., Марченко О.С., Михеев В.В. и др. Система машин и технологий для комплексной механизации и автоматизации сельскохозяйственного производства на период до 2020 года. Т. 1. Растениеводство. М.: ВИМ. 2012. 303 с.
7. Остроумов С.С., Кузьмин А.В. К выбору рациональных параметров роторного сепаратора картофелекопателя // *Вестник КрасГАУ*. 2014. №9. С. 182-187.
8. Остроумов С.С., Кузьмин А.В. Обоснование параметров ротора сепаратора картофелеуборочной машины // *Вестник ИрГСХА*. 2015. №66. С. 117-123.
9. Остроумов С.С. Результаты полевых испытаний нового картофелеуборочного комбайна // *Вестник ИрГСХА*. 2009. №36. С. 86-92.
10. Ксенович И.П., Варламов Г.П., Колчин Н.Н. и др. Машиностроение. Сельскохозяйственные машины и оборудование. Т. IV. М.: Машиностроение. 2002. С. 288-298.

REFERENCES

1. Reznikov L.A., Yeshchenko V.T., D'yachenko G.N., Sokol N.A. Osnovy proyektirovaniya i raschet sel'skokhozyaystvennykh mashin [Principles of designing and calculating the parameters of agricultural machinery]. Moscow. Agropromizdat. 1991. 428-446. (In Russian).
2. Turbin B.G., Lur'ye A.B., Grigor'yev S.M., Ivanovich E.M., Mel'nikov S.V. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny. Teoriya i tekhnologicheskiy raschet [Agricultural machinery. Theory and technological designing]. Leningrad. Mashinostroyeniye. 1967. 583. (In Russian).
3. Tubolev S.S., Shelomentsev S.I., Pshechenkov K.A., Zeyruk V.N. Mashinnyye tekhnologii i tekhnika dlya proizvodstva kartofelya [Machine technologies and machinery for potato production]. Moscow. Agrosapas. 2010. 176-188. (In Russian).
4. Klenin N.I., Kiselev S.N., Levshin A.G. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny [Agricultural machinery]. Mpscow. KolosS. 2008. 655-670. (In Russian).
5. Khalanskiy V.M., Gorbachev I.V. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny [Agricultural machinery]. Moscow. KolosS. 2004. 422-431. (In Russian).
6. Lachuga Yu.F., Gorbachev I.V., Ezhevskii A.A., Izmaylov A.Yu., Kriazhkov V.M., Antyshev N.M., Babchenko V.D., Beilis V.M., Golubkovich A.V., Grishin A.P., Evtushenkov N.E., Zhalnin E.V., Zhuk A.F., Kolesnikova V.A., Levina N.S., Lichman G.I., Marchenko N.M., Marchenko L.A., Marchen-

- ko O.S., Mikheev V.V. и др. Sistema mashin i tekhnologii dlya kompleksnoy mekhanizatsii i avtomatizatsii sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva na period do 2020 goda [System of machines and technologies for integrated mechanization and automation of agricultural production for the period until 2020]. Vol. 1. Rasteniyevodstvo [Crop cultivation]. Moscow. VIM, 2012. 303. (In Russian).
7. Ostroumov S.S., Kuz'min A.V. K vyboru ratsional'nykh parametrov rotnogo separatora kartofelekopatelya [On the selection of optimal parameters of a rotary separator of a potato harvester]. *Vestnik KrasGAU*. 2014. 9. 182-187. (In Russian).
8. Ostroumov S.S., Kuz'min A.V. Obosnovaniye parametrov rotna separatora kartofeleuborochnoy mashiny [Determination of parameters of a rotary separator of a potato harvester]. *Vestnik IrGSKHA*. 2015. 66. 117-123. (In Russian).
9. Ostroumov S.S. Rezul'taty polevykh ispytaniy novogo kartofeleuborochnogo kombayna [Field test results of a new potato combine harvester]. *Vestnik IrGSKHA*. 2009. 36. 86-92. (In Russian).
10. Ksenevich I.P., Varlamov G.P., Kolchin N.N. et al. Mashinostroyeniye. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i oborudovaniye [Machine Engineering. Encyclopedia. Agricultural machinery and equipment]. Vol. IV. Moscow. Mashinostroyeniye. 2002. 288-298. (In Russian).

Статья поступила в редакцию 03.04.2018
The paper was submitted
to the Editorial Office on 03.04.2018

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья принята к публикации 29.06.2018
The paper was accepted
for publication on 29.06.2018

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

The Lobe-Type Agitator Parameters of the Seed-Metering Unit in the Seed-Fertilizer Drill Justification

Dzhadyger Z. Yeskhozhin¹,

Dr.Sc.(Eng.), professor, e-mail: deshojin@mail.kz;

Sayakhat O. Nukeshev¹,

Dr.Sc.(Eng.), academician of the Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan, corresponding member of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan, dean;

Gennadiy I. Lichman²,

Dr.Sc.(Eng.), chief specialist;

Yerzhan S. Akhmetov¹,

Ph.D.(Eng.), associate professor, head of the department;

Kairat D. Yeskhozhin¹,

Ph.D.(Eng.), associate professor

¹Kazakhstan Technological University named after S.Seifullin, Republic of Kazakhstan;

²Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract: Livestock products are the most important component of the actual total volume of farm produce. A reliable fodder base is required to increase their quantity and quality. The most part of the natural forage lands of the Republic of Kazakhstan is located in areas with insufficient water availability and low soil productivity. When they are used intensively, they are thinned and degraded. Their restoration and improving is possible if effective technologies and technical means are effected. However, the existing methods for improving and restoring forage lands and the technical means for their implementation are not adapted to the natural-climatic and agrobiological features of the zone of Central and Northern Kazakhstan, which feature insufficient moisture supply and low productivity. The main indicator of the effectiveness of the use of fodder crop seeds is their uniform distribution in the soil. However, most of them, due to their poor flowability, form dome structures of different sizes in front of seeding openings, which hinder the seeding process. To increase the flowability of such seeds, they are mixed with sand, sawdust, fertilizer and other materials. However, during the operation of seeders, the mixture is stratified according to its specific gravity. (*The research purpose*) is to develop a lobe-type agitator, which prevents the formation of a dome over seed holes. (*Materials and methods*) Theoretical studies have been carried out using the methods of classical and applied mechanics, as well as special sections of higher mathematics. (*Results and discussion*) The authors have experimentally confirmed the main parameters of the agitator and its resistance to movement in a seed medium. Experimental studies have been carried out on the basis of GOST 31345-2007. The studies have confirmed that a four-lobe agitator with an external radius of 0.06 m and an inclination angle to the plane of rotation 20°, mounted on the fertilizer drill SZS-2.0, has shown a total resistance of 3,042 kg with a design value of 2.925 kg. (*Conclusions*) The obtained results can be offered to the designers and developers of machines of the considered type when calculating and designing their working elements.

Keywords: forage grassland, hayfields and pastures, sowing unit, lobe-type agitator, seed material, seed drill.

■ **For citation:** Yeskhozhin D.Z., Nukeshev S.O., Lichman G.I., Akhmetov Ye.S., Yeskhozhin K.D. The lobe-type agitator parameters of the seed-metering unit in the seed-fertilizer drill justification. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. 12(5). 20-24. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-20-24. (In Russian).

One of the most important ways of increasing livestock productivity is the availability of high-quality and high-efficiency feed supply. Most of the forage grasslands of the Republic of Kazakhstan are located in areas with insufficient moisture supply and low productivity. They are characterized by a thinned grass stand and an intensive loss of the most valuable forage plants. As a result, forage lands are becoming bare, so large areas of hayfields and pastures are degraded. The main reason is the lack of a scientifically based system of the use of forage grasslands, as well as efficient technologies and technical means for their restoration and improvement.

There are two main ways of restoring and improving forage grasslands - surface (topsoil) and fundamental improvement [1, 2]. These methods are widely used in grassland production of the Republic of Kazakhstan. Surface improvement involves land reclamation, fertilization, grass sowing, and does not involve the treatment of grassed (overgrown) soil. The effectiveness of sowing valuable forage plants may be insignificant due to the resistance of native plants, which are most adapted to local conditions. Therefore, it is used in areas with a highly thinned grass stand. If necessary, the competitiveness of local vegetation can be reduced using the pretreatment of a sod layer with disk implements

or rotary plows, while maintaining a part of the local grass stand intact.

If surface improvement does not bring the desired result, and the share of valuable forage plants of the natural grass stand does not exceed 25%, fundamental improvement can be applied. It involves plowing of forage grassland with simultaneous cutting of the sod layer, fertilization and sowing of a valid grass mixture.

In the first quarter of the twentieth century, a new lane method of improving forage lands was introduced [3, 4]. It provides for the destruction of old vegetation with the simultaneous loosening of the soil by stripes 15-18 cm wide and deep at an inter-row distance of 60-70 cm, sowing seeds into prepared strips and rolling. Old vegetation can be destroyed both mechanically and chemically (using herbicides). K.M. Shoemaker and L.P. Sinkovsky have contributed much to the development of this method.

In the last quarter of the twentieth century, the United States also began to use the strip method to improve pastures. This method implies that the old vegetation is destroyed on the strips of 10-25 cm with herbicides, then furrows of up to 2 cm wide and 5.7 cm deep are cut by disk implements (similar to a circular saw). The method is called "Zebra". Grass seeds are sown in the furrows obtained.

In Kazakhstan conditions, the most promising grass improvers include the hair grass (*Elymus junceus* Fisch), Siberian wheatgrass (*Agropyron sibiricum* Wild), desert wheatgrass (*Agropyron desertorum* Fisch), sand prostrate summer cypress (*Kochia prostrata* Schrad), white sagebrush (*Artemisia inana*), and sheep fescue (*Festuca salcata* Hack) [5, 6]. The given feed plants are characterized by poor flowability of their seeds, while awnchaff and ryegrass seeds are not free-flowing [7, 8].

To improve the sowing quality of such seeds and remove awns and hair films, they are passed through a clover-seed huller, a vegetable or flax grater, and brushing machines. They are also mixed with sand, sawdust, crushed manure and other ballast materials. However, these methods did not give positive results, since during the operations of seed drills the mixture was stratified according to specific gravity. For high-quality sowing of grass seeds, universal machines are required that simultaneously process and prepare the soil for sowing, introduce mineral fertilizers and sow seeds of grass mixture [7-9]. The absence of such machines makes impossible the practical improvement of hayfields and pastures in large areas of the Republic of Kazakhstan.

Seeds of numerous fodder plants feature a low volumetric weight and high coupling properties. The latter is due to the presence on their surfaces of developed awes and hair fluffs. During the evolution of plants, this contributed to the expansion of a range of particular

species. Currently, with the widespread use of mechanized methods of cultivating crops, these abilities of forage crop seeds have made a negative impact on the operation of the metering and sowing system of a machine [10]. Thus, lightweight non-flowing seeds, clinging to their awes and hairs for each other, form domes of varying size and strength above seed holes. They impede the natural advancement of seeds to the sowing unit and contribute to the termination of the sowing process. It can be restored only by preventing the formation of such domes.

The main indicator of the effectiveness of using forage crop seeds is the uniformity of their distribution in the soil. High uniformity of distribution is a guarantee of the efficiency of their use and high productivity of forage grasslands. At the same time, the value of the sowing element, which ensures a uniform seed supply to the coulter group, increases immeasurably.

THE RESEARCH PURPOSE is to develop a lobe-type seed agitator, which prevents the formation of domes above seed holes.

MATERIALS AND METHODS. One of the ways of improving the efficiency of the sowing unit is to turn the seeds of forage plants before they enter the metering unit. A number of agitating designs have been proposed: mechanical, electromagnetic, etc. By now, the spring-type agitator of the S.O. Nukeshev. However, it also has several disadvantages. First, the agitator is metal-intensive, the spring is installed over the entire width of the fertilizer box, on the through shaft. Second, it mechanically strongly influences the seeds, tearing them apart, which further reduces their natural flowability. Third, the agitator has a complex structure and is difficult to manufacture.

To solve the problem, the designers of KATU named after S.Seifullin have developed a lobe-type agitator, which is currently undergoing laboratory tests. Its solid shaft is located inside the seed box across its entire width. Mounted on the shaft opposite the seed holes are fixed crosses that are located in the plane of translational motion of the machine. The cross beams have lobe-type impellers of various shapes, the planes of which have a certain angle with the rotation plane of the crosses. The agitator shaft is driven by the support wheels or from the packer rollers together with the shaft of the sowing unit.

Studies are based on the methods of classical and applied mechanics, as well as special sections of higher mathematics. Experimental studies have been performed according to GOST 31345-2007. Seed drills were mounted on tractors. The results have been processed by the methods of mathematical statistics and probability theory.

RESULTS AND DISCUSSION. To substantiate the parameters of the lobe-type impeller of the agitator, we shall consider *Fig. 1*. Lobe *l-n* rotates at a speed ω around

the center O . Under the action of a lobe, the elementary volume of seed material 2 receives an absolute velocity V_2 . The direction of this velocity is determined by the angle γ_2 between its vector and the instantaneous radius R_2 . In this case, the amount of movement of the elementary volume will be equal to [8]:

$$S = mV_2, \quad (1)$$

where m is the material mass in the elementary volume.

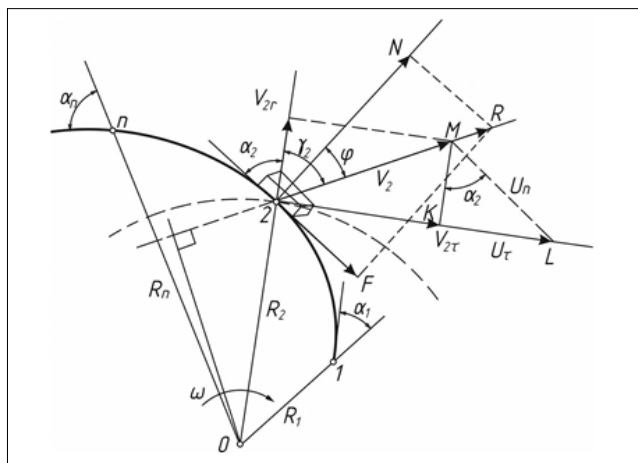


Fig. 1. Determination of the shape parameters of a lobe-type agitator

It is known that the angular momentum is equal to its product on the shoulder of the absolute velocity of the moving mass:

$$M = m V_2 R_2 \sin \gamma_2 \quad (2)$$

where the mass m indicates the proportion of seed that interacts with the agitator lobe in every second.

The speed of an elementary volume can be decomposed into two components: the tangential V_{2t} – acting perpendicular to the radius R_2 and the radial V_{2r} – acting along the radius. In this case, the angular momentum of the elementary volume of seed material at the points of arrival on the lobe and its descent (points 1 and n) will be similar to expression (2), and their difference is:

$$\Delta M = m(R_n V_{2n} - R_1 V_{21}) \quad (3)$$

It shows the change in the amount of the seed mass movement during its passing through the lobe.

We can determine the energy obtained by the elementary mass of seed material during its passing through the lobe:

$$\mathfrak{E} = \frac{\rho Q}{q} (U_{\tau n} V_{\tau n} - U_{\tau 1} V_{\tau 1}), \quad (4)$$

where: Q is seed material supply per second;

ρ is the volume weight of seeds;

g – gravitational acceleration;

$(U_{\tau n} = \omega R_n)$

$(U_{\tau 1} = \omega R_1)$ – linear velocities of the elementary volume at points (1, ..., n) of the lobe;

$V_{\tau n}$ is the projection of the resulting velocity of the elementary volume on the direction of the tangential velocity at points (1, ..., n) of the lobe.

The energy obtained by a unit volume allows determining the theoretical normal pressure exerted by the lobe on the seed material:

$$N = \frac{\mathfrak{E}}{Q} = \frac{\rho}{q} (U_{\tau n} V_{\tau n} - U_{\tau 1} V_{\tau 1}). \quad (5)$$

In expression (5), the normal pressure is referred to as theoretical because it does not take into account internal resistances and inertial processes. If we take them into account, the task becomes more complicated, and the result will change slightly. Accepted assumptions allow to obtain the desired patterns quickly and efficiently.

Basing on Figure 1, V_{2r} can be expressed in terms of U_{τ} and KL and the ratio of the speeds U_n and U_{τ} can be determined, and from the $2ML$ triangle, by the sine theorem, we obtain the tangential velocity of the elementary volume at the starting and ending points of the lobe.

Substituting the obtained expressions into equation (5) and performing the appropriate transformations, we get:

$$N = 30^{-2} \rho n^2 R_n^2 \left[\frac{\sin \gamma_n \cos \alpha_n}{\sin(\alpha_n + \gamma_n)} - \left(\frac{R_1}{R_n} \right)^2 \frac{\sin \gamma_1 \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \gamma_1)} \right], \quad (6)$$

where n is the speed of the lobe-type impeller;

$R/R_n = i$ is the ratio of the initial and final radii;

α – angles characterizing the lobe curvature;

γ – the angles between the radial direction and the resultant force R , which depend on the angle of external friction – for this structure and type of fertilizer the values are constant. Therefore, the expression in square brackets can be replaced by the letter A :

$$\frac{\sin \gamma_n \cos \alpha_n}{\sin(\alpha_n + \gamma_n)} - i^2 \frac{\sin \gamma_1 \cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 + \gamma_1)} = A.$$

Then, equation (6) can be presented in a short form:

$$N = 30^{-2} \rho n^2 R_n^2 A. \quad (7)$$

Consequently, the pressure that the lobe impeller exerts on the seed material is directly proportional to the square of the radius and the agitator speed.

The angles α in (6) can have different design values. The degree of the lobe impact on the material (grass seed or mineral fertilizer) depends on the ratio of their initial and final values. If the angle α constantly increases from α_1 to α_n , the lobe has a curvilinear shape and is

concave against the direction of the impeller rotation (Fig. 2a). If this angle decreases from α_1 to α_n , the lobe is concave in the direction of the impeller rotation (Fig. 2b).

In the general case, the lobe may be flat-rectilinear. In Fig. 2b, variant I, it is located radially. This is the simplest option for the design and manufacturing. In relation to the radial direction, the lobe can also be located at a certain angle. In Fig. 2b, variant II – it is located at a negative angle to the direction of rotation. In this option, the lobe has a minimal impact on the material.

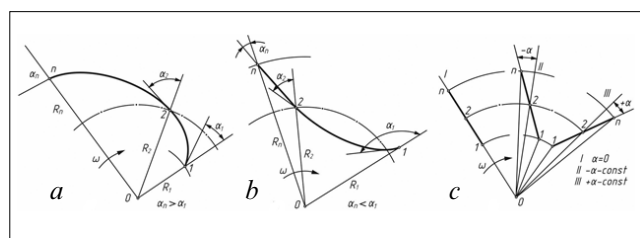


Fig. 2. Determination of the shape of the agitator lobes

In Fig. 2b, variant III, the lobe is located at a positive angle to the radial direction, so it is inclined forward in the direction of rotation. At the same time, the effect of the lobe on the material increases.

A plane-rectilinear lobe with its own plane can be located in the plane of rotation or at a certain angle to it. If it is located at a $\pi/2$ angle to the plane of rotation, it will offer the maximum effect on the material. The lobe will act as a scraper, and the resistance of the medium to its movement will be maximum. As a result, the consumption of energy and material required to maintain the strength of the working unit elements will increase.

Fig. 3a shows a four-bladed agitator. The flat-rectilinear lobes are located radially and at an angle β to the plane of rotation A-A, Fig. 3b. The elementary volume interacting with the B-B lobe is affected by the following forces: N is the normal pressure of the lobe on the elementary volume; F is the friction force between the elementary volume and the lobe.

The equilibrium state of the elementary volume on the lobe will occur when the projection of the acting forces on the A-A direction becomes equal:

$$F \cos \beta = N \sin \beta;$$

$$\varphi = \beta,$$

where F is the friction force between the elementary volume of the material and the lobe;

φ is the angle of friction between the material particle and the metal.

It follows from the last equation that for agitating of the seed material to be accompanied with sliding on the lobe, it is necessary to observe the following condition: $\beta \leq \varphi$. Otherwise, the material will be raked

by the scraper, which is undesirable in terms of energy and material consumption.

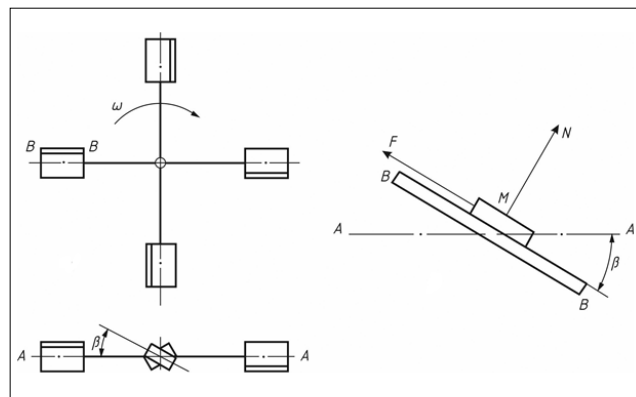


Fig. 3. Arrangement of the flat-rectilinear lobe of the agitator

When the radial arrangement of the lobes (the variant in Fig. 3a), the angles of the coefficient A in (7) are equal to:

$$\alpha = 0; \gamma = \pi/2.$$

In this case, the net effect of the lobe on the seed material, taking account of the influence of friction force, is:

$$R = 30^{-2} \rho n^2 R_n^2 \left[1 - (i)^2 \right] \frac{1}{\cos \varphi}. \quad (8)$$

The actual impact of the agitator lobe on the seed material must take account of the inertial forces of the material R_n . It is known from theoretical mechanics that these forces depend on the mass of a unit volume with inertia and on the square of its velocity V . To calculate the mass of a unit volume, the volume weight of the material should be multiplied by the surface area of the lobe previously projected into a direction transverse to the plane of rotation:

$$R_n = \rho S z V^2 \sin \beta \quad (9)$$

where: s is the lobe area, z is the number of lobes.

Using expressions (8) and (9), we can determine the actual resistance of the medium to the agitator movement in it:

$$P = \rho \left\{ s z V^2 \sin \beta + 30^{-2} n^2 R_n^2 \left[1 - (i)^2 \right] \frac{1}{\cos \varphi} \right\}. \quad (10)$$

For the numerical determination of the medium resistance to the agitator displacement, we take the values in equation (10) from the reference sources and on the basis of design solutions:

- volume weight of grass seeds is 100 kg/m³;
- the number of lobes – 4;
- linear velocity of the external point of the lobes – 0.63 m/s;
- the lobe outer radius – 0.06 m;
- the angle of the lobe inclination to the plane of

rotation – 200;

- the speed of the lobes – 30 rpm;

- the ratio between the inner radius of the lobe and the outer one – 0.66;

- the angle of friction between grass seeds and the metal – 17-22°;

- the lobe area – 0.002 m²;

- the angle of the lobe inclination – 200.

Substituting the numerical values in (10), we get:

$$P = 100 \left[0,002 \cdot 4 \cdot 0,4 \cdot 0,34 + 30^{-2} \cdot 30^2 \cdot 0,06^2 \left(1 - 0,66^2 \right) \frac{1}{0,94} \right] = 0,325 \text{ кг.}$$

Nine metering devices were installed on the C3C-2.0 seed-fertilizer drill. Therefore, it is necessary to install nine agitators per a machine. In this case, the total

resistance of the agitators of one seed-fertilizer drill will be equal to: $P_{\text{общ}} = P \cdot 9 = 0,325 \cdot 9 = 2,925 \text{ кг.}$

During laboratory studies, the experimental lobe-type agitators have shown the following resistances: 3.117; 3.101 and 2.91 kg. The average resistance is 3.042 kg. The coefficient of variation is 3.78% with a standard deviation of 0.115. We can assume that the experimental indicators confirm the calculated data.

CONCLUSION. It has been established that a four-lobe agitator with an outer radius of 0.06 m and an inclination angle to the plane of rotation of 20 degrees, mounted on an C3C-2.0 fertilizer-planter, has a total resistance of 3.042 kg with a calculated value of 2.925 kg. The results obtained are recommended to designers and developers of machines of this type to be used in the calculation and design of working elements.

REFERENCES

1. Yasir S.H., Liao Q.X., Yu J.J., He D.L. Design and test of a pneumatic precision metering device for wheat. *Agric Eng Int: CIGR Journal*. 2014. 1. 16-25. (In English).
2. Cebecauer T., Hofierka J. The consequences of land-cover changes on soil erosion distribution in Slovakia. *Geomorphology*. 2008. 98(3-4). 187-198. (In English).
3. Savel'yev Yu.A., Kryuchin A.N. Rezul'taty issledovaniy fiziko-mekhanicheskikh svoystv semyan trav [Results of studies of physical and mechanical properties of grass seeds]. *Izvestiya Samarskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2014. 3. 33-36. (In Russian).
4. Nesmiyan A.Yu. Tsench Yu.S. Tendentsii i perspektivy razvitiya otechestvennoy tekhniki dlya poseva zernovykh kul'tur [Trends and prospects for the development of domestic machinery for grain crop planting]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol.12. N3. 45-52. (In Russian)
5. Poltorynkin S.S., Tseplyayev A.N. Nekotoryye fiziko-mekhanicheskiye svoystva trudnosypuchikh semyan (tereskena i prutnyaka) [Some physical and mechanical properties of hard seeds (Tereskena and Prutyanka)]. *Izvestiya Nizhnevolzhnogo agrouniversitetskogo kompleksa*. 2013. 3(31). 220-225. (In Russian).
6. Ebrahim A., Hamid R.G., Mohammad M., Kyeong U.K. Development of a precision seed drill for oilseed rape. *Turk J. Agric*. 2008. 32. 451-458. (In English).
7. Karayel D. Performance of a modified precision vacuum seeder for no-till sowing of maize and soybean. *Soil & Tillage Research*. 2009. 104(1). 121-125. (In English).
8. Petrov A.M. Razrabotka universal'noy seyalki dlya zernovykh melkosemennykh i trudnovysevayemykh kul'tur [Development of a universal seed drill for small-grain and hard-cropping cereals]. *Izvestiya Samarskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii*. 2014. 3. 37-39. (In Russian).
9. Trukhachev Ye.D. Obosnovaniye rezhima raboty i konstruktivnykh parametrov vysevayushchey chasti seyalki dlya poseva nesypuchikh semyan kormovykh kul'tur [Determining the operating mode and design parameters of the sowing part of a seeder for non-loose seeds of feed crops]. *Vestnik APK Stavropol'ya*. 2013. 2(10). 127-131. (In Russian).
10. Pyatayev M.V. Issledovaniye protsessa dvizheniya chastitsy vysevayemogo materiala v vertikal'nom truboprovode raspredelatelya pnevmaticheskoy zernovoy seyalki [Studying of the movement process of a sown material particle in a vertical pipeline of a pneumatic seed drill]. *Vestnik CHGAU*. 2010. Vol. 56. 133-136. (In Russian).

The paper was submitted
to the Editorial Office on 27.04.2018

The paper was accepted
for publication on 04.07.2018

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

Метод получения тяговой характеристики трактора в эксплуатационных условиях

Алексей Григорьевич Арженовский¹,
кандидат технических наук, доцент;
Дмитрий Сергеевич Козлов¹,
аспирант;

Николай Алексеевич Петрищев²,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
gosniti14@mail.ru

¹Азово-Черноморский инженерный институт – филиал Донского государственного аграрного университета, г. Зерноград, Российская Федерация;

²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Одно из важнейших направлений повышения эффективности сельскохозяйственного производства – совершенствование методов и средств определения основных показателей тракторов. От их значений зависят производительность, экономичность и экологическая безопасность машинно-тракторных агрегатов. (*Цель исследования*) Разработать метод получения тяговой характеристики трактора, позволяющий снизить трудоемкость измерений в условиях эксплуатации, и прибор для экономичного получения тяговых характеристик тракторов в условиях конкретных хозяйств. (*Материалы и методы*) Выбрали метод определения энергетических показателей тракторов в эксплуатационных условиях на переходном режиме. Провели тяговые испытания трактора на различных режимах и почвенных фонах для оценки его тягово-динамических и топливно-экономических показателей. Тяговая характеристика трактора представляет собой зависимости рабочих показателей трактора (тяговой мощности, скорости, часового и удельного расходов топлива, буксования) от нагрузки на различных передачах на данном почвенном фоне. Однако тяговые испытания требуют дорогостоящего оборудования, а также существенных затрат средств и времени на подготовку и проведение, что обуславливает их выполнение лишь в условиях машиноиспытательных станций. (*Результаты и обсуждение*) Разработали метод получения тяговой характеристики трактора в эксплуатационных условиях. Мгновенно увеличивая подачу топлива до максимальной, при разгоне трактора измеряли значения угловых скоростей коленчатого вала двигателя и путеизмерительного колеса на заданной передаче и соответствующем почвенном фоне с нагрузкой и без нее. Выявили, что топливно-экономические показатели можно определить при циклическом характере подачи топлива топливным насосом на максимальном режиме на стенде для проверки и регулировке топливного оборудования. Разработали и собрали измерительно-вычислительный комплекс, позволяющий обработать массивы данных от двух индукционных датчиков. (*Выводы*) Предлагаемый метод определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов и измерительно-вычислительный комплекс, его реализующий, позволяют получать тяговую характеристику (зависимости скорости, буксования, тяговой мощности, часового и удельного расходов топлива от нагрузки на различных передачах на данном почвенном фоне) в эксплуатационных условиях, обеспечивая снижение затрат времени и средств.

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

■ **Для цитирования:** Арженовский А.Г., Козлов Д.С., Петрищев Н.А. Метод получения тяговой характеристики трактора в эксплуатационных условиях // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №5. С. 25-30. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-25-30.

Determining the Traction Characteristic of a Tractor in Operating Conditions

Aleksey G. Arzhenovskiy¹,
Ph.D.(Eng.), associate professor;
Dmitriy S. Kozlov¹,
postgraduate student;

Nikolay A. Petrishchev²,
Ph.D.(Eng.), key research engineer,
gosniti14@mail.ru

¹Azov-Black Sea State Engineering Institute – Branch of Federal State Budgetary Educational Establishment of Higher Professional Education “Don State Agrarian University”, Zernograd, Russian Federation;

²Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. One of the most important aspects in terms of increasing the efficiency of agricultural production is the improvement of the methods and tools of determining the main operating indicators of tractors as they influence the productivity, efficiency and ecological safety of machine-tractor units. (*Research purpose*) To develop a method for obtaining traction characteristics of a tractor, which make it possible to reduce the time needed for measurements under operating conditions, and to design an instrument for economical obtaining of tractors' traction characteristics under specific farm conditions. (*Materials and methods*) the authors have chosen a method for determining the energy performance of tractors under operating conditions in a transient mode. They have conducted traction tests of tractors for various modes and soil backgrounds to evaluate its traction-dynamic and fuel-economic indicators. The traction characteristic of a tractor is the dependence of the tractor performance (traction power, speed, hourly and specific fuel consumption, and slipping) on the load at various speeds against a given soil background. However, traction tests require expensive equipment, as well as significant costs and time to prepare and conduct, which leads to their implementation only in the conditions of machine testing stations. (*Results and discussion*) The authors have developed a method for obtaining traction characteristics of a tractor under operating conditions. Instantly increasing the fuel supply to the maximum, during the tractor acceleration, the engine crankshaft speed and track-measuring wheel were measured at a given speed and against the corresponding soil background - with load and without load. It has been revealed that the fuel and economic indicators can be determined using cyclical fuel supply by the fuel pump at the maximum mode on the bench for checking and adjusting the fuel equipment. The authors have developed and assembled a measuring and computing installation that allows processing arrays of data from two inductive sensors. (*Conclusions*) The proposed method for determining the traction-dynamic and fuel-economic indicators of tractors and the measuring-computing installation that implements it allow obtaining a traction characteristic (speed, slipping, traction power, hourly and specific fuel consumption depending on the load at various speeds against a given soil background) in operating conditions, thus reducing the time and cost of operation.

Keywords: transient mode, tractor, mass, speed, acceleration, slipping, drawbar pull, tractive power, hourly and specific fuel consumption.

■ **For citation:** Arzhenovskiy A.G., Kozlov D.S., Petrishchev N.A. Determining the traction characteristic of a tractor in operating conditions. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. 12(5). 25-30. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-25-30. (In Russian).

Одним из важнейших направлений повышения эффективности сельскохозяйственного производства служит совершенствование методов и средств определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов. От их значений напрямую зависят производительность, экономичность и экологическая безопасность машинно-тракторных агрегатов (МТА) [1-4].

Для оценки тягово-динамических и топливно-экономических показателей трактора на различных режимах и почвенных фонах проводят его тяговые испытания в соответствии с ГОСТ 7057-2001. Результаты испытаний представляют либо в табличной форме, либо в виде кривых на одном графике и называют тяговой характеристикой трактора.

Тяговая характеристика представляет собой зависимости рабочих показателей трактора (тяговой мощности, скорости, часового и удельного расходов топлива, буксования) от нагрузки на различных передачах на данном почвенном фоне ($N_{кр}$, V , G_T , $g_{кр}$, $\delta = f(P_{кр})$). Для ее получения требуется дорогостоящее оборудование (динамометрическая лаборатория), а также существенные затраты средств и времени на подготовку и проведение соответствующих испытаний. Это обуславливает выполнение подобных исследований лишь в условиях машино-

испытательных станций [5].

В связи с этим разработка методов и средств получения тяговых характеристик тракторов, приемлемых не только для машиноиспытательных станций, но и для конкретных хозяйств представляет значительный интерес.

В данной работе исследован метод определения энергетических показателей тракторов в эксплуатационных условиях на переходном режиме, разработанный в Азово-Черноморском инженерном институте [6-8]. Согласно этому методу, исследуемый трактор разгоняется при мгновенном увеличении подачи топлива от минимально устойчивой до максимальной скорости равномерного прямолинейного движения. При разгоне трактора измеряют значения угловых скоростей и ускорений коленчатого вала двигателя и путеизмерительного колеса на заданной передаче и соответствующем почвенном фоне.

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

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

где M_T – приведенная масса трактора, кг;

(dV/dt) – ускорение трактора, m/c^2 ;

$P_{дв}$ – движущая сила трактора, Н;

P_f – сила сопротивления перекачиванию, Н;



$P_{кр}$ – сила тяги на крюке трактора, Н.

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

$$P_{кр} = M_T (dV/dt), \text{ Н.} \quad (2)$$

Приведенная масса трактора определяется по формуле:

$$M_T = M \Psi, \text{ Н,} \quad (3)$$

где M – эксплуатационная приведенная масса трактора, кг;

Ψ – коэффициент учета вращающихся масс на данной передаче.

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

Цель исследования – разработка метода получения тяговой характеристики трактора, позволяющего снизить трудоемкость измерений в условиях эксплуатации, и прибора для экономичного получения тяговых характеристик тракторов в условиях конкретных хозяйств.

Материалы и методы. Проблему определения приведенной массы трактора решают, выполняя дополнительные разгоны на различных передачах трактора, догруженного известной (эталонной) массой, и фиксируя значения углового ускорения путеизмерительного колеса [9-11]. Уравнение движения трактора будет иметь вид:

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

где $M_{эт}$ – дополнительная (эталонная) масса, которой догружается трактор, кг;

$(dV/dt)_{эт}$ – ускорение трактора при разгоне с дополнительной (эталонной) массой.

Из уравнения (1) и (4) определим массу трактора:

$$M_m = \frac{M_{эм} ((dV/dt)_{эм} + gf)}{(dV/dt) - (dV/dt)_{эм}}, \text{ кг,} \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 ;

f – коэффициент перекачивания трактора.

Ускорение трактора при его разгоне без нагрузки, а также трактора, догруженного эталонной массой, связано с угловым ускорением путеизмерительного колеса следующими зависимостями:

$$(dV/dt)_{xx} = (d\omega/dt)_{xx} r_{пк}, \text{ м/с}^2, \quad (6)$$

$$(dV/dt)_{эт} = (d\omega/dt)_{эт} r_{пк}, \text{ м/с}^2, \quad (7)$$

где $(d\omega/dt)$, $(d\omega/dt)_{эт}$ – соответственно угловое ускорение путеизмерительного колеса при разгоне трактора без нагрузки и с дополнительной (эталонной) массой, рад/с^2 ;

$r_{пк}$ – радиус путеизмерительного колеса, м.

Результаты и обсуждение. С учетом вышеизложенного предлагаемый метод получения тяговой характеристики трактора в эксплуатационных условиях заключается в следующем. При движении трактора за счет снижения подачи топлива достигают частоты вращения коленчатого вала, соответствующей минимально устойчивой скорости равномерного прямолинейного движения. Мгновенно увеличивают подачу топлива до максимальной. При разгоне трактора измеряют значения угловых скоростей и ускорений коленчатого вала двигателя и путеизмерительного колеса на заданной передаче и соответствующем почвенном фоне. Кроме того, измеряют угловое ускорение путеизмерительного колеса при разгоне трактора с дополнительной (эталонной) массой на заданной передаче и соответствующем почвенном фоне.

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

Скорость трактора на заданной передаче:

$$V = \omega_{пк} r_{пк}, \text{ м/с,} \quad (8)$$

где $\omega_{пк}$ – угловая скорость путеизмерительного колеса, рад/с .

Буксование трактора:

$$\delta = \frac{\omega_{вк} - \omega_{пк}}{\omega_{вк}} 100\%, \%, \quad (9)$$

где $\omega_{вк}$ – угловая скорость ведущего колеса (звездочки), рад/с .

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

$$\omega_{вк} = \frac{\omega_{кв}}{i_{тр}}, \text{ рад/с,} \quad (10)$$

где $\omega_{кв}$ – угловая скорость коленчатого вала двигателя трактора, рад/с ;

$i_{тр}$ – общее передаточное число трансмиссии на заданной передаче.

Тяговую мощность на заданной передаче находим по формуле:

$$N_{кр} = P_{кр} \cdot V, \text{ Вт.} \quad (11)$$

Топливо-экономические показатели определяют, фиксируя цикловую подачу при циклическом характере подачи топлива топливным насосом на максимальном режиме на стенде для проверки и регулировки топливного оборудования.

Часовой расход топлива определяем по формуле:

$$G_m = \frac{60 V n_p \rho}{10^6 i_y}, \text{ кг/ч,} \quad (12)$$

где V – объем поданного топлива всеми секциями

топливного насоса высокого давления (ТНВД) за 1000 циклов, см³;

n_n – частота вращения вала ТНВД, об/мин;

ρ – плотность топлива, кг/м³;

i_n – количество циклов ($i_n = 1000$).

Удельный расход топлива:

$$g_e = \frac{1000 G_m}{N_e}, \text{ г·ч/Вт.} \quad (13)$$

Реализуя предлагаемый метод, разработали и сконструировали измерительно-вычислительный комплекс (ИВК), который включает стенд проверки и регулировки топливного насоса, погрузочное устройство, путеизмерительное колесо, РС, датчики оборотов коленчатого вала и путеизмерительного колеса. Для обработки исходной информации разработан пакет программных средств, позволяющий определять совокупность зависимостей ($N_{кр}$, V , G_t , $g_{кр}$, $\delta = f(P_{кр})$) на различных передачах на данном почвенном фоне. Для этого фиксируют и обрабатывают массив данных от двух индукционных датчиков, установленных напротив зубчатых венцов маховика коленчатого вала и шестерни, жестко связанной с путеизмерительным колесом.

При прохождении зубьев венцов маховика и шестерни перед датчиками в них генерируется ЭДС с частотой, пропорциональной угловым скоростям соответствующих венцов. Сигналы от датчиков фиксируют в памяти персонального компьютера РС посредством аналого-цифрового преобразователя ADC, платы сопряжения, а также пакета соответствующих программ.

Определение тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов предлагаемым информационно-внедренческим комплексом (ИВК) осуществляется в четыре этапа:

1. Подготовка трактора и ИВК к работе.

2. Запись сигналов от датчиков оборотов коленчатого вала двигателя и путеизмерительного колеса при разгоне трактора без нагрузки и с дополнительной (эталонной) массой на различных передачах на данном почвенном фоне.

3. Определение цикловой подачи топлива топливным насосом на максимальном режиме на стенде для проверки и регулировки топливного оборудования.

4. Обработка полученных данных.

Подготовка трактора и ИВК к работе заключается в развертывании комплекса, присоединении путеизмерительного колеса и установке индукционных датчиков.

Запись сигналов от датчиков оборотов коленчатого вала двигателя и путеизмерительного колеса при разгоне трактора без нагрузки и с дополнительной (эталонной) массой на различных передачах на данном почвенном фоне формирует массив

данных об ЭДС, генерируемых катушками соответствующих индукционных датчиков при определенных разгонах трактора.

При разгоне трактора значения ЭДС датчиков оборотов коленчатого вала и путеизмерительного колеса посредством ADC фиксируются в памяти компьютера с частотой, равной половине частоты опроса (для двух каналов). Аналогично фиксируются значения ЭДС датчиков при разгоне трактора с дополнительной (эталонной) массой.

В результате получаем файлы с данными о значениях ЭДС катушек датчиков оборотов в кодовой форме. Пакет прикладных программ ADC позволяет преобразовать данные в цифровую форму. При просмотре полученных файлов в графическом режиме отображаются графики изменения ЭДС датчиков в координатах времени разгона (t). Программа выдает порядковый номер измерения (опроса) для любой точки графика.

Цикловую подачу топлива топливным насосом на максимальном режиме определяют на стенде для проверки и регулировки топливного оборудования, входящем в предлагаемый измерительно-вычислительный комплекс [6].

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

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

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

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

Выводы. Предлагаемый метод определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей тракторов и измерительно-вычислительный комплекс, его реализующий, позволяют полу-



чать тяговую характеристику (зависимости скорости, буксования, тяговой мощности, часового и удельного расходов топлива от нагрузки на раз-

личных передачах на данном почвенном фоне) в эксплуатационных условиях, обеспечивая снижение затрат времени и средств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Shevtsov V., Lavrov A., Izmaylov A., Lobachevskii Ya. Formation of Quantitative and age structure of tractor park in the conditions of limitation of resources of agricultural production // *SAE Technical Papers*. 2015. September. pp. 1-4.
2. Lobachevskii Y., Godzhaev Z., Shevtsov V., Lavrov A., Sizov O., Merzlyakov A. Harmonizing power categories and towing categories of agricultural tractors with series of preferred numbers // *SAE Technical Papers*. 2017. January. pp. 18-24.
3. Измайлов А.Ю., Кряжков В.М., Антышев Н.М., Елизаров В.П., Лобачевский Я.П., Сорокин Н.Т., Гурылев Г.С., Савельев Г.С., Сизов О.А., Шевцов В.Г. Концепция модернизации сельскохозяйственных тракторов и тракторного парка России на период до 2020 года. М.: ВИАХ. 2012. 88 с.
4. Елизаров В.П., Артюшин А.А., Ценч Ю.С. Перспективные направления развития отечественной сельскохозяйственной техники // *Вестник ВИАХ*. 2018. N2 (31). С. 12-18.
5. Гуськов В.В., Дзёма А.А., Кокола А.С., Макаренко Р.Ю., Зезетко Н.И. Исследование процесса взаимодействия ведущих колес трактора с грунтовой поверхностью // *Наука и техника*. 2017. N1. С. 83-88.
6. Селиванов Н.И., Кузьмин Н.В., Кузнецов А.В. Рациональные режимы использования трактора

- тягово-энергетической концепции в составе почвообрабатывающих агрегатов // *Вестник КрасГАУ*. 2008. N2. С. 238-244.
7. Арженовский А.Г. Совершенствование методов и средств определения тягово-динамических и топливно-экономических показателей трактора в эксплуатационных условиях // *Тракторы и сельхозмашины*. 2017. N11. С. 29-35.
8. Арженовский А.Г., Валуев Н.В., Забродин В.П. Ресурсосберегающие методы испытания двигателей, тракторов и сельскохозяйственных машин // *Вестник аграрной науки Дона*. 2017. N4. С. 47-51.
9. Щитов С.В., Худолец В.И., Кузнецов Е.Е. Расширение функциональных возможностей тракторов класса 1, 4 // *Дальневосточный аграрный вестник*. 2016. N1 (37). С. 64-70.
10. Измайлов А.Ю., Евтюшенков Н.Е., Дзюцендзе Т.Д., Левшин А.Г., Галкин С.Н. Инновационное развитие транспортной сферы агропромышленного комплекса М.: ВИМ. 2011. 230 с.
11. Галкин С.Н., Дзюцендзе Т.Д., Левшин А.Г., Евтюшенков Н.Е., Измайлов А.Ю. Агротехнологические и технологические параметры автомобилей сельскохозяйственного назначения // *Тракторы и сельхозмашины*. 2011. N5. С. 3-6.

REFERENCES

1. Shevtsov V., Lavrov A., Izmaylov A., Lobachevskii Y. Formation of Quantitative and age structure of tractor park in the conditions of limitation of resources of agricultural production. *SAE Technical Papers*. 2015. September: 1-4. (In English).
2. Lobachevskii Y., Godzhaev Z., Shevtsov V., Lavrov A., Sizov O., Merzlyakov A. Harmonizing power categories and towing categories of agricultural tractors with series of preferred numbers. *SAE Technical Papers*. 2017. January. 18-24. (In English).
3. Izmaylov A.Yu., Kryazhkov V.M., Antyshev N.M., Yelizarov V.P., Lobachevskiy YA.P., Sorokin N.T., Gurylev G.S., Savel'yev G.S., Sizov O.A., Shevtsov V.G. Kontseptsiya modernizatsii sel'skokhozyaystvennykh traktorov i traktornogo parka Rossii na period do 2020 goda [The concept of modernization of agricultural tractors and the tractor fleet of Russia for the period up to 2020]. Moscow. VIESKH. 2012: 88. (In Russian).
4. Yelizarov V.P., Artyushin A.A., Tsench YU.S. Perspektivnyye napravleniya razvitiya otechestvennoy sel'skokhozyaystvennoy tekhniki [Promising development trends of domestic agri-

- cultural machinery]. *Vestnik VIESKH*. 2018. 2(31). 12-18. (In Russian).
5. Gus'kov V.V., Dzoma A.A., Kokola A.S., Makarenko R.Yu., Zezetko N.I. Issledovaniye protsessa vzaimodeystviya vedushchikh koles traktora s gruntovoy poverkhnost'yu [Study of the interaction process between the tractor's driving wheels and a dirt surface]. *Nauka i tekhnika*. 2017. 1. 83-88. (In Russian).
6. Selivanov N.I., Kuz'min N.V., Kuznetsov A.V. Ratsional'nyye rezhimy ispol'zovaniya traktora tyagovo-energeticheskoy kontseptsii v sostave pochvoobrabatyvayushchikh agregatov [Rational modes of utilizing a conceptual traction power tractor as part of soil tillage units]. *Vestnik KrasGAU*. 2008. 2. 238-244. (In Russian).
7. Arzhenovskiy A.G. Sovershenstvovaniye metodov i sredstv opredeleniya tyagovo-dinamicheskikh i toplivno-ekonomicheskikh pokazateley traktora v ekspluatatsionnykh usloviyakh [Improving the methods of and tools for determining traction-dynamic and fuel-economic indicators of a tractor in operating conditions]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2017. 11. 29-35. (In Russian).

8. Arzhenovskiy A.G., Valuyev N.V., Zabrodin V.P. Resursosberegayushchiye metody ispytaniya dvigateley, traktorov i sel'skokhozyaystvennykh mashin [Resource-saving methods for testing engines, tractors and agricultural machines]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2017. 4. 47-51. (In Russian).

9. Shchitov S.V., Khudovets V.I., Kuznetsov Ye.Ye. Rasshireniye funktsional'nykh vozmozhnostey traktorov klassa 1, 4 [Extending functional capabilities of Class 1, 4 tractors]. *Dal'nevostochnyy agrarnyy vestnik*. 2016. 1(37). 64-70. (In Russian).

10. Izmaylov A.Yu., Yevtyushenkov N.Ye. Dzotsenidze T.D., Levshin A.G., Galkin S.N. Innovatsionnoye razvitiye transportnoy sfery agropromyshlennogo kompleksa [Innovative development of the transport sector of the farming industry] Moscow. VIM. 2011. 230. (In Russian).

11. Galkin S.N., Dzotsenidze T.D., Levshin A.G., Yevtyushenkov N.Ye., Izmaylov A.Yu. Agrotekhnologicheskiye i tekhnologicheskiye parametry avtomobiley sel'skokhozyaystvennogo naznacheniya [Agrotechnological and technological parameters of agricultural vehicles]. *Traktory i sel'khoz-mashiny*. 2011. 5. 3-6. (In Russian).

Статья поступила в редакцию 03.04.2018
The paper was submitted
to the Editorial Office on 03.04.2018

Статья принята к публикации 25.05.2018
The paper was accepted
for publication on 25.05.2018

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

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

осуществляет подготовку
на бюджетные и платные места
в аспирантуру и магистратуру

высшее образование – программа подготовки научно-педагогических кадров

Лицензия №2498 от 15.02.2016

Государственная аккредитация №2475 от 19 января 2017 года

Адрес института: 109428, Москва, 1-й Институтский проезд, 5.

Телефон для справок: 8 (499) 709-33-68

Обоснование конструктивно-технологических параметров инжекторного распылителя

Леонид Анатольевич Марченко¹,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник, e-mail: marchenko1312@mail.ru;

Максим Александрович Сафонов²,
преподаватель

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

²Колледж «Подмосковье», г. Клин, Российская Федерация

Реферат. Сельскохозяйственные штанговые опрыскиватели оснащаются инжекторными распылителями преимущественно зарубежного производства. Основные параметры инжекторных распылителей, приводимые в каталогах, отображают расходные характеристики в определенных диапазонах без учета конструктивных параметров. (*Цель исследования*) Обосновать конструктивно-технологические параметры инжекторного распылителя для внесения пестицидов. (*Материалы и методы*) Инжекторный распылитель относится к классу двухфазных жидкостно-газовых изотермических струйных аппаратов с образованием на выходе водовоздушной смеси. Установили, что расчетная модель рабочего процесса инжекторного распылителя основывается как на законах сохранения массы, энергии, импульса, на теоретических зависимостях в виде уравнений характеристики двухфазных струйных аппаратов, так и эмпирических зависимостях, характеризующих параметры потоков, геометрические поперечные и продольные размеры каналов распылителя. (*Результаты и обсуждения*) Получили следующие аналитические зависимости: относительного перепада давлений, создаваемого инжекторным распылителем, от объемного коэффициента инжекции при различных отношениях площади выходного отверстия рабочего сопла к сечению проточной части распылителя; отношения площади сечения камеры смешения к площади выходного отверстия рабочего сопла от коэффициента инжекции; относительного перепада давлений от коэффициента инжекции; отношения площади сечений камеры смешения и рабочего сопла от относительного перепада давлений. Определили совокупность безразмерных напорных характеристик инжекторного распылителя при различных отношениях площади сечения рабочего сопла к площади сечения камеры смешения. Установили, что с повышением коэффициента инжекции увеличивается отношение сечений площади камеры смешения к площади рабочего сопла. Показали, что для каждого коэффициента инжекции существует свой достижимый относительный перепад давления в инжекторном распылителе. (*Выводы*) Предложили расчетные уравнения, определяющие характеристики работы инжекторного распылителя и его основные конструктивные параметры – диаметры сопла и камеры смешения. Рассчитали основные размеры распылителя при авиационном способе внесения рабочих растворов пестицидов.

Ключевые слова: распылитель инжекторный, сопло, давление.

■ **Для цитирования:** Марченко Л.А., Сафонов М.А. Обоснование конструктивно-технологических параметров инжекторного распылителя // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №5. С. 31-38. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-31-38.

Determination of an Injection Sprayer's Technological Parameters

Leonid A. Marchenko¹,
Ph.D.(Eng), key researcher,
e-mail: marchenko1312@mail.ru;

Maksim A. Safonov²,
lecturer

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

²«Podmoskovye» College, Klin, Russian Federation

Abstract. Agricultural boom sprayers are equipped with injection sprayers of mainly foreign origin. The main parameters of the injection sprayers shown in the catalogs display the consumption characteristics in certain ranges without taking into account the design parameters. (*Research purpose*) Determination of the design and technological parameters of an injection sprayer for the introduction of pesticides. (*Materials and methods*) The injection sprayer belongs to the class of

two-phase liquid-gas isothermal jet devices with the formation of an air-gas mixture at the outlet. It has been established that the design model of the working process of an injection sprayer is based both on the laws of the conservation of mass, energy, momentum, as well as theoretical relationships in the form of equations describing two-phase jet devices, and empirical relationships characterizing flow parameters, geometric transverse and longitudinal dimensions of the spray channels. (*Results and discussion*) The following analytical relationships have been obtained: the relative pressure difference generated by an injection sprayer and the volume injection coefficient for different surface area ratios of the working nozzle to the flow section of the sprayer; the ratio between the cross-sectional area of the mixing chamber to the area of the working nozzle outlet and the injection ratio; relative pressure difference and the injection ratio; the ratio between the cross-sectional area of the mixing chamber and the working nozzle and the relative pressure difference. The authors have determined a set of dimensionless pressure characteristics of the injection sprayer for different ratios between the cross-sectional areas of the working nozzle and the mixing chamber. It has been established that the ratio between the cross sections of the mixing chamber area and the working nozzle area increases as the injection ratio increases. It has been shown that for each injection coefficient, there is an achievable relative pressure difference in the injection sprayer. (*Conclusions*) The authors have proposed the design equations that determine the characteristics of an injection sprayer and its main design parameters – the diameters of nozzle and mixing chambers. They have calculated the main dimensions of the sprayer for aerial top-dressing by introducing working solutions of pesticides.

Keywords: injection sprayer, nozzle, pressure.

For citation: Marchenko L.A, Safonov M.A. Determination of an injection sprayer's technological parameters. *Selskokhozyaistvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. 12(4): 31-38. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-31-38. (In Russian).

Эффективность работы сельскохозяйственных опрыскивателей характеризуется качеством внесения рабочих растворов пестицидов с установленной агротехнической нормой на каждом участке обрабатываемого поля, равномерным их распределением по ходу движения и на рабочей ширине захвата опрыскивателя, заданной густотой покрытия обрабатываемой поверхности растений и монодисперсным распылом. Из многочисленных факторов, влияющих на качество внесения пестицидов, одним из определяющих служит дисперсность распыла [1]. Монодисперсный распыл минимизирует снос пестицидов с обрабатываемого участка поля [2].

В настоящее время на опрыскивателях широко применяют инжекторные распылители, позволяющие создать относительно монодисперсный спектр капель, увеличить их объем за счет насыщения капель воздухом, что уменьшает снос капель при воздействии внешних факторов и повышает качество обработки посевов. Проведенные исследования показали эффективность таких распылителей [3-6]. Несмотря на широкое применение инжекторных распылителей в сельскохозяйственных опрыскивателях до настоящего времени оптимального метода расчета их параметров нет.

Цель исследования – обосновать конструктивно-технологических параметров инжекторного распылителя для внесения пестицидов.

Материалы и методы. Инжекторный распылитель относится к классу двухфазных жидкостно-газовых изотермических струйных аппаратов, в проточных каналах которого осуществляется подача

и смешение двух струй (жидкости и воздуха) с образованием на выходе газожидкостной смеси, поступающей далее в щелевое сопло, посредством которого она диспергируется на обрабатываемые растения в виде пузырьковых капель, насыщенных воздухом.

Расчетная модель рабочего процесса инжекторного распылителя основывается на законах сохранения массы, энергии, импульса, теоретических зависимостях в виде уравнений характеристики двухфазных струйных аппаратов, эмпирических зависимостях, характеризующих параметры потоков, геометрические поперечные и продольные размеры каналов распылителя. Характерной особенностью исследуемых инжекционных аппаратов является то, что полное давление газожидкостной смеси на выходе из аппарата больше полного давления газового компонента, но меньше полного давления рабочего потока жидкости на входе в аппарат, при этом массовый расход инжектируемого воздуха на несколько порядков меньше массового расхода рабочей жидкости, что предполагает использование объемного коэффициента инжекции. Основной характеристикой двухфазных струйных аппаратов, к которым относится инжекторный распылитель, служит зависимость относительного перепада давлений от отношения площадей сечений проточной части аппарата, коэффициента инжекции, гидравлических коэффициентов [7, 8]:

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P_p} = F\left(\frac{f_3}{f_{p1}}, U_0, \varphi_1\right), \quad (1)$$

где ΔP_c – перепад давлений, создаваемый инжекто-

ром; ΔP_p – перепад давлений рабочего потока; f_3 – площадь выходного сечения камеры смешения; f_{p1} – площадь выходного отверстия сечения рабочего сопла; U_0 – объемный коэффициент инжекции; ϕ_i – гидравлический коэффициент.

$$U_0 = \frac{V_n}{V_p}, \quad (2)$$

где V_n – объемный расход инжектируемой среды; V_p – объемный расход рабочей среды.

Схема инжекторного распылителя приведена на рисунке 1.

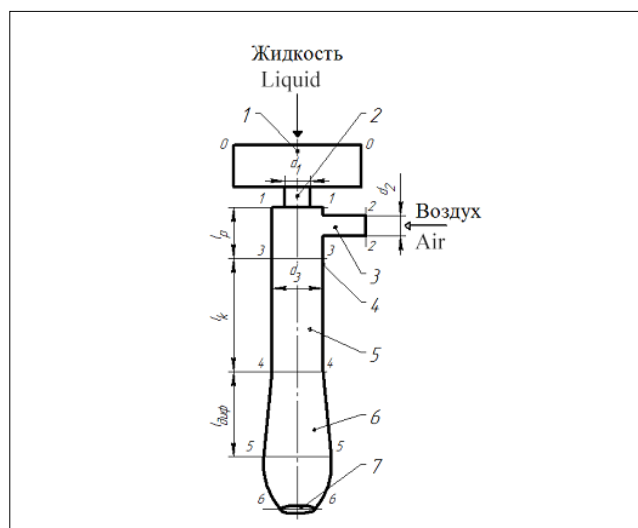


Рис. 1. Схема инжекторного распылителя:

1 – подведенный трубопровод; 2 – сопло рабочее; 3 – сопло воздушное; 4 – приемная камера; 5 – камера смешения; 6 – диффузор; 7 – сопло щелевое; 0-0, 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5, 6-6 – сечения потоков жидкости, воздуха и смешанного потока в проточных камерах распылителя; d_1 – диаметр рабочего сопла; d_2 – диаметр воздушного сопла; d_3 – диаметр камеры смешения; ℓ_p – расстояние от рабочего сопла до камеры смешения; ℓ_k – длина камеры смешения; $\ell_{диф}$ – длина диффузора
Fig. 1. Diagram of the injection sprayer: 1 – a ducted pipeline; 2 – a working nozzle; 3 – an air nozzle; 4 – an inlet chamber; 5 – a mixing chamber; 6 – a diffuser; 7 – a slotted nozzle; 0-0, 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5, 6-6 – sections of liquid, air and mixed flows in the flow chambers of the injection sprayer; d_1 – the working nozzle diameter; d_2 – the air nozzle diameter; d_3 – the mixing chamber diameter; ℓ_p – the distance from the working nozzle to the mixing chamber; ℓ_k – the mixing chamber length; $\ell_{диф}$ – the diffuser length

Для обоснования конструктивно-технологических параметров инжекторного распылителя в общем случае должны быть заданы следующие параметры: рабочий диапазон давлений рабочего P_p и инжектируемого P_n потоков, температура рабочей T_p и инжектируемой T_n сред, рабочий диапазон массовых расходов рабочего G_p и инжектируемого G_n потоков, рабочий диапазон значений объемно-

го коэффициента инжекции U_0 . Определяют оптимальное значение основного геометрического параметра – отношения площадей сечений цилиндрической камеры смешения f_3 и выходного отверстия сопла f_{p1} , рассчитывают геометрические параметры, влияющие на рабочую характеристику инжекторного распылителя.

Для расчета угла расширения внешней границы струи рабочего потока, характеризваемого величиной корневого угла факела распыла, воспользуемся зависимостью [9] в виде:

$$\operatorname{tg}(\alpha/2) = CWe^k Lp^l M^m, \quad (3)$$

где α – угол расширения факела жидкости, распыленной струйным соплом; C, k, l – постоянные числа, полученные при обработке опытных данных; We – критерий Вебера; Lp – критерий Лапласа; M – критерий, характеризующий собой инерционные свойства газовой среды и жидкости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Для установления связи между давлением и скоростью в сечениях проточной части инжекторного распылителя составлена система уравнений Бернулли для рабочего потока в сопловом устройстве (сечения 0-0 и 1-1), рабочего потока, поступающего в камеру смешения (сечения 1-1 и 3-3), потока воздуха, поступающего в приемную камеру (сечения 2-2 и 3-3), для потока газожидкостной смеси, поступающей в диффузор (сечения 4-4 и 5-5) и внутренний корпус щелевой форсунки (сечения 5-5 и 6-6).

Система уравнений Бернулли замыкается уравнением импульсов в гидродинамической форме для контрольного отсека камеры смешения ограниченного сечения 3-3 и 4-4:

$$\frac{P_p}{\rho_p g} + \frac{\omega_p^2}{2g} = \frac{P_{p1}}{\rho_p g} + \frac{\omega_{p1}^2}{2g} (1 + \zeta_c), \quad (4)$$

$$\frac{P_{p1}}{\rho_p g} + \frac{\omega_{p1}^2}{2g} = \frac{P_{p3}}{\rho_p g} + \frac{\omega_{p3}^2}{2g} (1 + \zeta_{вх}), \quad (5)$$

$$\frac{P_n}{\rho_n g} + \frac{\omega_n^2}{2g} = \frac{P_{n3}}{\rho_n g} + \frac{\omega_{n3}^2}{2g} (1 + \zeta_{вх}), \quad (6)$$

$$\frac{P_{c4}}{\rho_c g} + \frac{\omega_{c4}^2}{2g} = \frac{P_{c5}}{\rho_c g} + \frac{\omega_{c5}^2}{2g} (1 + \zeta_{диф.}), \quad (7)$$

$$\frac{P_{c5}}{\rho_c g} + \frac{\omega_{c5}^2}{2g} = \frac{P_{c6}}{\rho_c g} + \frac{\omega_{c6}^2}{2g} (1 + \zeta_{щ.}), \quad (8)$$

где: $P_p, P_{p1}, P_n, P_{p3}, P_{n3}, P_{c4}, P_{c5}, P_{c6}$ – давления рабочего потока перед инжекторным распылителем, в выходном сечении рабочего сопла, инжектируемого потока перед инжекторным распылителем, рабочего и инжектируемого потоков во входном сечении камеры смешения, смешанного потока в выходном сечении камеры смешения, на выходе из

диффузора и внутреннем корпусе щелевой форсунки соответственно;

$\omega_p, \omega_{p1}, \omega_n, \omega_{p3}, \omega_{n3}, \omega_{c4}, \omega_{c5}, \omega_{c6}$ – скорость рабочего потока перед инжекторным распылителем, на выходе из рабочего сопла, инжектируемого потока перед воздушным соплом, рабочего и инжектируемого потоков во входном сечении камеры смешения, смешанного потока в выходном сечении камеры смешения, на выходе из диффузора и внутреннем корпусе щелевой форсунки;

ρ_p, ρ_n, ρ_c – плотность рабочего, инжектируемого и смешанного потоков;

$\zeta_c, \zeta_{вх}, \zeta_{диф}, \zeta_{щ}$ – коэффициенты сопротивления сопла, входа в камеру смешения диффузора и щелевой форсунки;

g – ускорение свободного падения.

Для замыкания системы уравнений (4)-(8) записывается уравнение импульсов в гидродинамической форме для контрольного отсека камеры смешения ограниченного сечения 3-3 и 4-4, характеризующее изменение количества движения, равное импульсу силы:

$$\begin{aligned} \varphi_2(G_p \omega_{p1} + G_n \omega_{n3}) + (G_p + G_n) \cdot \omega_{c4} = \\ = (P_{c4} - P_{n3})f_{n3} + (P_{c4} - P_{p1}) \cdot f_{p1} = \\ = P_{c4}f_3 - P_{n3}f_{n3} - P_{сн}f_{p1} - P_{p1}f_{p1} \end{aligned} \quad (9)$$

где φ_2 – коэффициент скорости потока смеси в камере смешения, учитывающий потери количества движения в камере смешения из-за трения ($\varphi_2 < 1$).

В уравнении (9) принимается, что площадь рабочего потока во входном сечении камеры смешения f_{p3} равна площади выходного отверстия рабочего сопла f_{p1} и скорость рабочего потока во входном сечении камеры смешения ω_{p3} равна скорости рабочего потока ω_{p1} в выходном сечении рабочего сопла.

Система уравнений (4)-(9) позволяет по известным параметрам рабочего и инжектируемого потоков на входе в инжекторный распылитель найти основные конструктивно-технологические параметры, определяющие эффективность работы распылителя.

В результате совместного решения уравнений Бернулли и уравнения импульсов выводят безразмерную характеристику инжекторного распылителя, аналогичная основной характеристике водовоздушного эжектора [8]:

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P_p} = \varphi_c^2 \frac{f_{p1}}{f_3} [2\varphi_{см} - (2 - \varphi_{диф}^2) \frac{f_{p1}}{f_3} (1 + u_0)^2], \quad (10)$$

где ΔP_c – перепад давлений, создаваемый инжекторным распылителем; ΔP_p – перепад давлений рабочего потока; f_{p1} – площадь выходного отверстия сечения рабочего сопла; f_3 – площадь выходного сечения камеры смешения; $\varphi_c, \varphi_{вх,см}, \varphi_{диф}$ – коэффициенты скорости потока смеси в поперечном сечении сопла, входного участка камеры смешения, диффу-

зора; u_0 – объемный коэффициент инжекции;

$$\Delta P_c = \Delta P_c - P_n; \Delta P_p = \Delta P_p - P_n.$$

Используя уравнение (10), построим зависимости $\Delta P_c/\Delta P_p = F(U_0)$ при ограничениях $0,1 \leq f_{p1}/f_3 \leq 0,6$, представляющие собой совокупность безразмерных характеристик инжекторного распылителя (рис. 2). Параметром совокупности характеристик будет относительная величина сечений проточной части распылителя f_{p1}/f_3 . Из рисунка 2 следует, что зависимости $\Delta P_c/\Delta P_p = F(U_0)$ расположены в нижней левой части координатной плоскости и ограничиваются осями ординат, абсцисс и огибающей кривой, которая определяет область возможных режимов работы распылителя и устанавливает предельные значения его параметров.

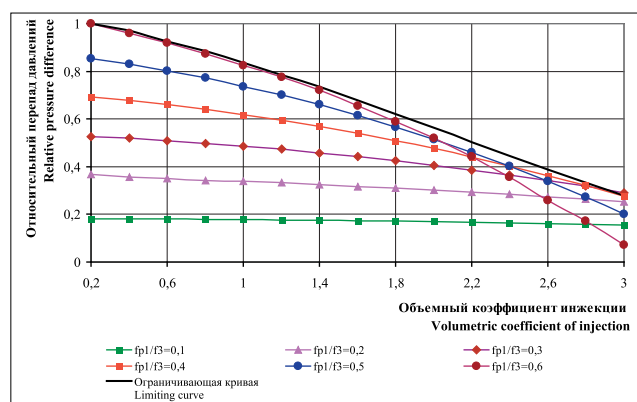


Рис. 2. Зависимость относительного перепада давлений $\Delta P_c/\Delta P_p$, создаваемого инжекторным распылителем, от объемного коэффициента инжекции U_0 при различных отношениях площади выходного отверстия рабочего сопла к сечению проточной части распылителя f_3/f_{p1}

Fig. 2. Relationship between the relative pressure difference made by the injection sprayer and the volumetric injection coefficient U_0 at different ratios of the outlet section of the working nozzle to the flowing part section of the injection sprayer f_3/f_{p1}

Дифференцируем уравнение (10) по переменной f_{p1}/f_3 , приравнявая производную к нулю, решаем полученное уравнение и делаем соответствующие преобразования, получаем зависимости для определения оптимального значения отношения сечений (f_{p1}/f_3), достижимого перепада давления $\Delta P_c/\Delta P_p = F(u_0)$ без необходимости расчета поперечных сечений сопла f_{p1} и камеры смешения f_3 и зависимость для определения оптимального отношения f_3/f_{p1} проточной части распылителя по заданному относительному перепаду давления $\Delta P_c/\Delta P_p$:

$$\left(\frac{f_3}{f_{p1}}\right)_{opt} = \frac{(2 - \varphi_{диф}^2) \cdot (1 + U)^2}{\varphi_{см}}, \quad (11)$$

$$\frac{\Delta P_c}{\Delta P_p} = \frac{\varphi_c^2 \cdot \varphi_{см}^2}{(2 - \varphi_{диф}^2) \cdot (1 + u_0)^2}, \quad (12)$$

$$\left(\frac{f_3}{f_{p1}}\right)_{opt} = \varphi_c^2 \cdot \varphi_{см} \cdot \frac{\Delta P_p}{\Delta P_c} \quad (13)$$

На основании уравнения (11) построена зависимость $(f_3/f_{p1})_{opt} = F(U_0)$ (рис. 3), иллюстрирующая факт увеличения отношения сечений $(f_3/f_{p1})_{opt}$ с повышением коэффициента инжекции, то есть каждому оптимальному значению $(f_3/f_{p1})_{opt}$ соответствует свое значение коэффициента инжекции.

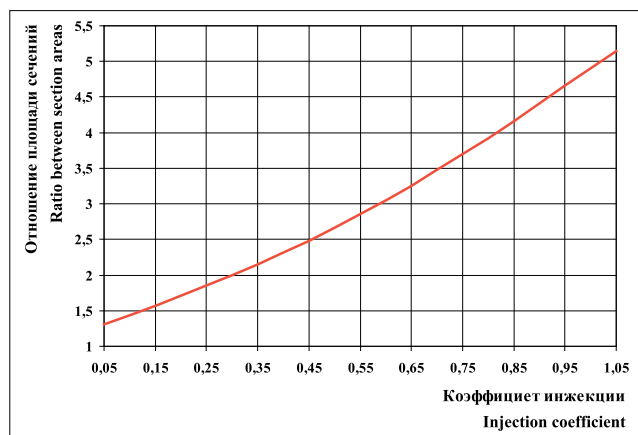


Рис. 3. Зависимость отношения площади сечения камеры смешения к площади выходного отверстия рабочего сопла f_3/f_p от коэффициента инжекции U_0

Fig. 3. Relationship between the ratio of the cross-sectional area of the mixing chamber to the outlet section area of the working nozzle f_3/f_p and the injection coefficient U_0

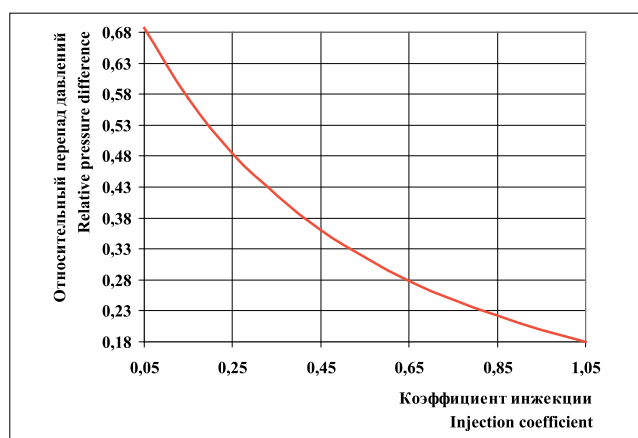


Рис. 4. Зависимость относительного перепада давлений $\Delta P_c/\Delta P_p$ от коэффициента инжекции U_0

Fig. 4. Relationship between the relative pressure difference $\Delta P_c/\Delta P_p$ and the injection coefficient U_0

На рисунке 4 представлена зависимость, рассчитанная по уравнению (12). Она показывает достижимый относительный перепад давления $\Delta P_c/\Delta P_p$ в инжекторном распылителе для каждого значения коэффициента инжекции.

Построенная по уравнению (13) зависимость оптимального отношения сечений $(f_3/f_{p1})_{opt}$ от перепада давлений $\Delta P_p/\Delta P_c$ имеет линейный характер,

и отношение сечений увеличивается с ростом перепада давлений (рис. 5).

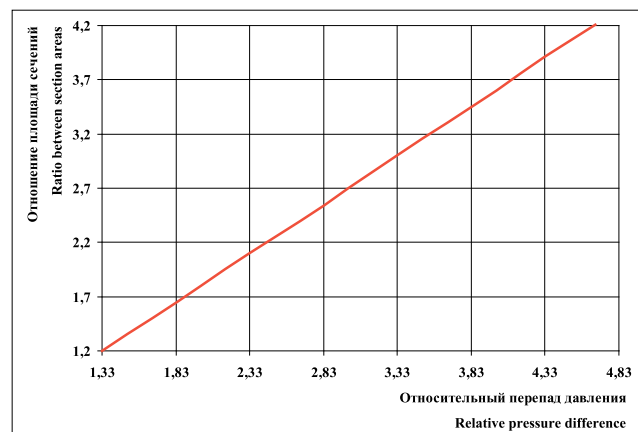


Рис. 5. Зависимость отношения площади сечения камеры смешения и рабочего сопла f_3/f_p от относительного перепада давлений P/P_p

Fig. 5. Relationship between the ratio of the cross-sectional area of the mixing chamber f_3/f_p and the working nozzle and the relative pressure difference P/P_p

Расход рабочей жидкости через один распылитель определяют, исходя из конструктивно-технологических параметров: нормы внесения рабочей жидкости H (кг/м²), рабочей ширины захвата B_p (м), рабочей скорости движения V_p (м/с) опрыскивателя, количества распылителей n_p на штанге. С учетом данных параметров площадь выходного отверстия рабочего сопла рассчитывают по формуле:

$$f_{p1} = \frac{H \cdot B_p \cdot V_p}{n_p \cdot \mu_c} \sqrt{\frac{1}{2\Delta P_p v_p}}, \quad (14)$$

Зная значения f_{p1} , рассчитывают площадь камеры смешения f_3 и соответственно диаметры сопла d_1 и камеры смешения d_3 .

Расстояние ℓ_p от выходного сечения рабочего сопла до входного сечения камеры смешения с учетом корневого угла факела, рассчитываемого по формуле (3) определяется отношением половины разности диаметров камеры смешения d_3 и рабочего сопла d_1 к значению тангенса половины угла расширения факела жидкости, распыленной струйным соплом.

Длина цилиндрической камеры смешения $\ell_{кв}$ выбирается обычно в пределах 6-10 диаметров камеры смешения [8].

Площадь выходного сечения диффузора ℓ_3 определяется по формуле:

$$f_{c5} = \frac{v_p \cdot \rho_p \cdot (1 + U_0)}{\rho_c \cdot \omega_{c5}}, \quad (15)$$

где v_p – объемный расход рабочего потока; ρ_c, ρ_p – плотность смешанного и рабочего потоков соответственно; ω_{c5} – скорость смешанного потока на

выходе из диффузора. При известном значении площади f_c рассчитывают диаметр диффузора.

Скорость ω_{c3} в выходном сечении диффузора определяется по формуле:

$$\omega_{c5} = \sqrt{\frac{2\Delta P_{c5}}{(1 + \xi_{\text{диф}}) \cdot \rho_c}}, \quad (16)$$

где ΔP_{c5} – перепад давления водовоздушного потока на выходе из диффузора; ρ_c – плотность водовоздушной смеси.

Длину диффузора $\ell_{\text{диф}}$ определяют по углу расширения диффузора как отношение половины разности диаметров выходного сечения диффузора d_{c5} и камеры смешения d_3 к значению тангенса половины угла расширения диффузора $\alpha_{\text{диф}}$.

Угол расширения диффузора обычно выбирают в пределах $6 \leq \alpha_{\text{диф}} \leq 10^\circ$, из расчета относительно низких значений коэффициента общих потерь давления в диффузоре, связанных с потерями на трение и расширение диффузора.

Оптимальным считается угол расширения диффузора $\alpha_{\text{диф}} = 8^\circ$. Коэффициент сопротивления диффузора при значениях $\alpha_{\text{диф}}$ в установленных пределах составляет $\zeta_{\text{диф}} = 0,08 + 0,16 [10]$.

Диаметры сопла d_1 и камеры смешения d_3 служат определяющими размерами инжекторного распылителя, с которыми связаны все остальные диаметральные и линейные размеры.

Основные исходные данные при расчете инжекторного распылителя включают: пределы изменения давления рабочего потока перед соплом $P_{\text{pmin}} \leq P_p \leq P_{\text{pmax}}$; давление инжектируемого потока (воздуха) P_n ; давление смешанного потока P_{c5} на выходе из диффузора, обеспечивающего заданные нормы расхода жидкостно-воздушной смеси; пределы объемного коэффициента инжекции $U_{0\text{min}} \leq U_0 \leq U_{0\text{max}}$; плотности рабочей ρ_p , инжектируемой ρ_n сред; температуру рабочей T_p и инжектируемой T_n сред; динамическую μ_p и кинематическую γ вязкость рабочей среды; коэффициент поверхностного натяжения рабочей среды σ_p .

В качестве рабочего сопла распылителя, в соответствии с рекомендациями, выбрано короткое цилиндрическое сопло с соотношением длины к диаметру в пределах 1,5-2,0 [11, 12].

При истечении маловязких жидкостей (вода и другие) из коротких цилиндрических сопел при достаточно больших числах Рейнольдса коэффициент истечения изменяется незначительно, и в расчетах принимают следующие значения коэффициентов: сжатия $\varepsilon_c = 0,64$, скорости $\varphi_c = 0,97$, расхода $\mu_c [9-11]$.

Значения коэффициентов скорости входа в камеру смешения, в камере смешения и диффузора составляют соответственно: $\varphi_{\text{вх.см}} = 0,925$; $\varphi_{\text{см}} = 0,958$; $\varphi_{\text{диф}} = 0,928$. Угол расширения диффузора 8° . Коэф-

фициент сопротивления цилиндрической камеры между выходным сечением диффузора и щелевым соплом $\zeta_{c6} [8, 13]$.

Давление инжектируемого воздуха перед воздушным соплом принято равным атмосферному давлению $P_n = 0,1$ МПа.

Давление смешанного потока на выходе из диффузора в пределах $P_{c5} = 0,3 + 0,7$ МПа выбирается из необходимости обеспечивать заданные нормы расхода водовоздушной смеси и процесс ее диспергирования.

Давление водовоздушного потока за выходным сечением диффузора перед щелевым соплом принято равным $0,5 + 0,8$ МПа.

Основные физические свойства взаимодействующих сред: плотности рабочей $\rho_p = 1000$ кг/м³ и инжектируемой $\rho_n = 1,225$ кг/м³ сред; вязкость рабочей среды динамическая $\mu_p = 1,14 \cdot 10^{-3}$ (Па·с)/м³ и кинематическая $\gamma_p = 1 \cdot 10^{-6}$ м²/с; коэффициент поверхностного натяжения рабочей среды $\sigma_p = 72,25 \cdot 10^{-3}$ н/м; температура рабочей $T_p = 15^\circ\text{C}$ и инжектируемой T_n сред = 15°C ; давление насыщенных паров $P_n = 1704$ Па.

Если $Re > 10^4$, то зависимость $\varphi_c = \varphi(Re)$ незначительна и значения коэффициентов φ_c и μ_c в расчетах принимают постоянными.

Расчет основных размеров инжекторного распылителя и его достижимых коэффициентов инжекции проведем при малых нормах расхода рабочей жидкости 20 л/га, что характерно при внесении пестицидов беспилотными летательными аппаратами (БЛА). Рабочая скорость полета БЛА – 40 км/ч. Расстояние между распылителями 0,25 м. Пределы изменения давления рабочего потока перед соплом распылителя $P_p = 0,6 + 1,0$ МПа.

Давление водовоздушной смеси в выходном сечении из диффузора $P_{c5} = 0,4$ МПа, за выходным сечением диффузора перед щелевым соплом составляет $P_{c6} = 0,5$ МПа, а давление инжектируемого воздуха перед распылителем – $P_n = 0,1$ МПа.

В результате получили следующие параметры распылителя.

Перепад давления водовоздушного потока, создаваемого инжекторным распылителем, $\Delta P_c = 0,3$ МПа. Перепад давлений рабочего потока с пределами изменения, ΔP_p составляет от 0,5 до 0,9 МПа. Объемный расход рабочей жидкости через один распылитель при норме внесения 20 л/га составляет $V_p = 0,556 \cdot 10^{-6}$ м³/с. В пределах изменения перепада рабочего давления перед соплом (0,5-0,9 МПа) диапазоны значений площади f_{p1} , диаметра d_{p1} выходного отверстия рабочего сопла, скорости истечения ω_{p1} , предельных значений коэффициента Рейнольдса Re составили: $f_{p1} = 0,0286 \cdot 10^{-6} - 0,0213 \cdot 10^{-6}$ м²; $d_{p1} = 0,0190 \cdot 10^{-3} - 0,165 \cdot 10^{-3}$ м; $\omega_{p1} = 30,37 - 40,76$ м/с; $Re = 5061,67 - 18628,0$.



Пределы оптимального отношения сечений $(f_{p1}/f_3)_{opt}$ распылителя при относительном перепаде давлений $\Delta P_p / \Delta P_c$ от 1,667 до 3,0: $(f_{p1}/f_3)_{opt} = 1,502-2,704$.

При ΔP_p в пределах 0,5-0,9 МПа площадь камеры смешения и диаметр камеры смешения d_3 соответственно составляют: $f_3 = 0,043 \cdot 10^{-6} - 0,058 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; $d_3 = 0,234 \cdot 10^{-3} - 0,270 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; критерии Вебера: $We = 7703,0-11980,0$, Лапласа $Lp = 33523,0-28964,0$, критерий $M = 1,225 \cdot 10^{-3}$.

Значение критерия $M = 1,225 \cdot 10^{-3}$ характеризует малое противодавление перед соплом инжекторного распылителя. При малых противодавлениях значения констант составляют: $C = 0,00364$; $\kappa = 0,32$; $\ell = 0,07$; $m = 0$; угол распыления струи: $\alpha = 15-17,2^\circ$; расстояние от выходного сечения рабочего сопла до выходного сечения камеры смешения: $\ell_p = 0,52 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; длина камеры смешения: $\ell_{kc} = 4,16 \cdot 10^{-3} - 6,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Коэффициент инжекции: при $f_3/f_{p1} = 1,502-0,666$, $\Delta P_c / \Delta P_p = 0,6$ ($\Delta P_c = 0,3 \text{ МПа}$; $\Delta P_p = 0,5 \text{ МПа}$) составляет $U_0 = 0,03$; при $f_3/f_{p1} = 0,333$, $f_{p1}/f_3 = 0,34$, $\Delta P_c / \Delta P_p = 0,333$ ($\Delta P_c = 0,3 \text{ МПа}$; $\Delta P_p = 0,9 \text{ МПа}$) = $U_0 = 0,56$. Плотность водовоздушного потока: $P_c = 970,07-440,68 \text{ кг/м}^3$. Скорость водовоздушного потока на выходе из камеры смешения $\omega_{c4} = 13,73-32,46 \text{ м/с}$.

Давление P_{c4} в выходном сечении камеры смешения и выходном сечении диффузора: $P_{c4} = 286226-122816 \text{ Па}$. Перепад давления на диффузоре: $\Delta P_{диф} = 106176-269584 \text{ Па}$. Перепад давления за выходным сечением диффузора перед щелевым соплом распылителя: $\Delta P_{c4} = 98100 \text{ Па}$. Площадь вы-

ходного сечения диффузора: $f_{c5} = 0,043 \cdot 10^{-6} - 0,094 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Скорость в выходном сечении диффузора: $\omega_{c5} = 13,95-20,69 \text{ м/с}$. Диаметр выходного сечения диффузора: $d_{c5} = 0,23 \cdot 10^{-3} - 0,34 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Длина диффузора: $\ell_{диф.} = 0-0,551 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. При коэффициенте инжекции $U_0 = 0,03$ диффузор не нужен. При коэффициенте инжекции $U_0 = 0,54$ длина диффузора: $\ell_{диф.} = 0-0,551 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Выводы

Определение основных параметров инжекторного распылителя состоит в построении характеристики его работы, представляющей зависимость относительного перепада давления, создаваемого инжекторным распылителем от объемного коэффициента инжекции, определении отношения площади сечения камеры смешения к площади выходного отверстия рабочего сопла при установленных значениях коэффициентов скорости водовоздушной смеси в основных проточных элементах распылителя: рабочего сопла, камеры смешения, диффузора, определении основных размеров проточной части распылителя: диаметров рабочего сопла, камеры смешения, выходного сечения диффузора; длины камеры смешения и диффузора.

Диаметры сопла и камеры смешения служат определяющими размерами инжекторного распылителя, с которыми связаны все остальные диаметральные и линейные размеры.

Рассчитали основные размеры распылителя при авиационном способе внесения рабочих растворов пестицидов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горбачев И.В., Марченко Л.А., Кузьмин А.Ю. Технологические аспекты внесения пестицидов // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2011. N11. С. 13-16.
2. Веретенников Ю. М., Долженко В.И., Горбачев И. В. и др. Монодисперсные техногенные аэрозоли. М.: Россельхозакадемия. 2013. 42 с.
3. Langenbruch G.A. Maiszunsler bald im hohen Norden? Starkere Ausbreitung des Schadlings in Deutschland befurchtett // DLZ Agramag. AgroBonus. Jg.52. N5. pp. 36-38.
4. Ellis M.C.B., Swan T., Miller P.C.H., Waddelow S., Bradiey A., Tuck C.R. De-sign factors affecting spray characteristics and drift performance of air induction nozzies // Biosystems Engg. 2002. Vol. 82. N3. pp. 289-296.
5. Neue Spritzdusen mit Luftunterstutzung // Profi Magazin fur professionelle Agrar-technik. 2010. N7. pp. 107.
6. Корнилов Т.В. Сравнительные характеристики стандартного щелевого распылителя и щелевого распылителя с эжекцией воздуха // Защита и карантин растению. 2010. N2. С. 46-48.
7. Цегельский В.Г. Двухфазные струйные аппараты. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2003. 408 с.
8. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. 3-е изд. М.: Энергоатомиздат. 1989. 252 с.
9. Лышевский А.С. Распыливание топлива в судовых дизелях. Л.: Судостроение. 1976. 100 с.
10. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. Л.: Машиностроение. 1969. 524 с.
11. Сивов Б.Н. Истечение жидкости через насадки в среды с противодавлением. М.: Машиностроение. 1968. 140 с.
12. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Распылители жидкостей. М.: Химия. 1979. С. 53-54.
13. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы. 2-е изд. М.: Машиностроение. 1982. 109 с.

REFERENCES

1. Gorbachev I.V., Marchenko L.A., Kuz'min A.Yu. Tekhnologicheskiye aspekty vneseniya pestitsidov [Technological aspects of pesticide application]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2011. 11. 13-16.
2. Veretennikov Yu. M., Dolzhenko V.I., Gorbachev I. V. et al. Monodispersnyye tekhnogennyye aero-zoli [Monodisperse technogenic aerosols]. Moscow. Rossel'khozakademiya. 2013. 42.
3. Langenbruch G.A. Maiszunsler bald im hohen Norden? Starkere Ausbreitung des Schadlings in Deutschland befurchtett. *DLZ Agramag. AgroBonus. Jg. 52. 5. 36-38*.
4. Ellis M.C.B., Swan T., Miller P.C.H., Waddelow S., Bradiey A., Tuck C.R. Design factors affecting spray characteristics and drift performance of air induction nozzies. *Biosystems Engg.* 2002. 82. 3. 289-296.
5. Neue Spritzdusen mit Luftunterstutzung. *Profi Magazin fur professionelle Agrartechnik*. 2010. 7. 107.
6. Kornilov T.V. Sravnitel'nyye kharakteristiki standartnogo shchelevogo raspylitelya i shchelevogo raspylitelya s ezhektsiyey vozdukha [Comparative characteristics of a standard slit sprayer and slit nozzle with air ejection]. *Zashchita i karantin rasteniyu*. 2010. 2. 46-48.
7. Tsegel'skiy V.G. Dvukhfaznyye struynnye apparaty [Two-phase jet devices]. Moscow. MGTU im. N.E. Bauman. 2003. 408.
8. Sokolov Ye.Ya., Zinger N.M. Struynnye apparaty [Jet installations]. M.: Energoatomizdat. 1989. 3rd ed.: 252.
9. Lyshevskiy A.S. Raspylivaniye topliva v sudovykh dizelyakh [Spraying of fuel in marine diesel engines]. Ltningrad. Sudostroyeniye. 1976. 100.
10. Povkh I.L. Tekhnicheskaya gidromekhanika [Technical hydromechanics]. Leningrad. Mashinostroyeniye. 1969. 524.
11. Sivov B.N. Istecheniye zhidkosti cherez nasadki v srede s protivodavleniyem [Expiration of liquid in-to the atmosphere through the nozzles with back pressure]. Moscow. Mashinostroyeniye. 1968. 140.
12. Pazhi D.G., Galustov V.S. Raspyliteli zhidkostey [Sprayers of liquids]. Moscow. Khimiya. 1970. 53-54.
13. Bashta T.M., Rudnev S.S., Nekrasov B.B. et al. Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives]. 2nd ed. Moscow. Mashinostroyeniye. 1982. 109.

Статья поступила в редакцию 11.05.2018
The paper was submitted
to the Editorial Office on 11.05.2018

Статья принята к публикации 25.07.2018
The paper was accepted
for publication on 25.07.2018

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Инфракрасная сушка семян в псевдооживленном слое

Яков Петрович Лобачевский,
доктор технических наук, член-корреспондент
Российской академии наук,
главный научный сотрудник;

Сергей Анатольевич Павлов,
кандидат технических наук, ведущий научный со-
трудник,
e-mail: sapavlov777@mail.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Инфракрасная сушка нашла широкое применение преимущественно в пищевой промышленности. Семена зерновых культур сушат в основном конвективным методом в шахтных, колонковых и бункерных сушилках. Подобные методы сушки малоэффективны, их отличает низкая производительность и высокие удельные затраты тепла. Исследовали методы сушки, обеспечивающие высокую интенсивность процесса при максимальном сохранении качества семян. Один из них – комбинированная инфракрасная сушка. Сушка имеет ряд преимуществ перед конвективной сушкой – быстрый прогрев частиц обеспечивает сокращение длительности процесса, а суммирование процессов диффузии и термодиффузии способствует перемещению влаги из центра зерновки к периферии, что снижает удельные затраты тепла на сушку. Рассмотрели комбинированный метод с использованием псевдооживленного слоя при малой интенсивности инфракрасного потока, с дополнительным подводом тепла подогретым наружным воздухом. *(Цель исследования)* Разработать математическую модель конвективно-радиационной инфракрасной сушки семян, рассчитать температуру поверхности, мощность инфракрасного излучателя, параметры подогрева воздуха. *(Материалы и методы)* Обосновали параметры комбинированной инфракрасной сушки используя закономерности, характерные для конвективной сушки, но с эквивалентным коэффициентом теплоотдачи. Определили температуру и мощность источника инфракрасной энергии на основе допустимого теплоснабжения. Экспериментально оценили эффективность инфракрасной сушки при продувке наружным и подогретым воздухом с конвективной сушкой. *(Результаты и обсуждение)* Температура поверхности и мощности инфракрасного излучателя зависят от толщины слоя, физико-механических и радиологических свойств семян, допустимого теплосодержания и теплоты, затраченной на испарение влаги. Установили, что экспозиция комбинированной сушки на 12 процентов ниже конвективной за счет интенсификации процесса при полном сохранении качественных показателей семян. *(Выводы)* Рассчитали температуру поверхности и мощность инфракрасного излучателя в зависимости от высоты слоя, физико-механических и радиологических свойств семян, допустимого теплосодержания и теплоты, затраченной на испарение влаги. Величина степени нагрева воздуха при комбинированной инфракрасной сушке пропорциональна дефициту мощности инфракрасного излучателя и обратно пропорциональна эквивалентному коэффициенту теплоотдачи.
Ключевые слова: инфракрасная сушка, температура, мощность инфракрасного источника, псевдооживление, эксперимент.

■ **Для цитирования:** Лобачевский Я.П., Павлов С.А. Инфракрасная сушка семян в псевдооживленном слое // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2018. Т. 12. №4. С. 39-43. DOI 10.22314/2618-6748-2018-12-5-39-43.

Infrared Drying of Seeds in a Fluidized Bed

Yakov P. Lobachevsky,
Dr.Sc.(Eng.), corresponding member of the Russian
Academy of Sciences, chief research associate;

Sergey A. Pavlov,
Ph.D.(Eng), key research engineer, e-mail: sapavlov777@
mail.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. Infrared drying (IR) has found wide application mainly in the food industry. Seeds of cereal crops are dried mainly by a convection method using shaft, column and bunker dryers. Such drying methods are ineffective, they are characterized by low productivity and high specific heat costs. The author has studied some methods of drying ensuring high intensity of the process with the maximum preservation of the quality of seeds. One of them is combined infrared drying. Combined modes of IR drying have a number of advantages over convection drying - quick heating of the particles ensures shortened process time, and the combination of diffusion and thermal diffusion processes facilitates the transfer of moisture from the grain mass center to the periphery, which reduces the specific heat consumption of a drying process. The author has considered a combined method with

the use of a fluidized bed with a low intensity of the IR flow, with an additional supply of heat by the heated external air. (*Research purpose*) To develop a mathematical model of convective radiation IR drying of seeds, to calculate the surface temperature, the power of an IR-emitter, and the parameters of air heating. (*Materials and methods*) The parameters of combined IR drying have been determined using the regularities characteristic for convective drying, but with an equivalent heat transfer coefficient. The temperature and power of the IR energy source have been determined on the basis of permissible heat supply. The author has experimentally evaluated the efficiency of IR drying with blowing by external and heated air with convection drying. (*Results and discussion*) The surface temperature and the power of an IR emitter depend on the thickness of the layer, physical-and-mechanical and radiological properties of seeds, permissible heat content and heat spent on the evaporation of moisture. It has been established that the exposure of combined drying is 12 percent lower than that of convective drying due to the process intensification with full preservation of the quality parameters of seeds. (*Conclusions*) The surface temperature and power of an IR emitter have been calculated as a function of the layer height, physical-and-mechanical and radiological properties of seeds, permissible heat content and heat spent on the evaporation of moisture. The degree of air heating with combined IR drying is proportional to the power deficit of an IR emitter and is inversely proportional to the equivalent heat transfer coefficient.

Keywords: IR-drying, temperature, power of an IR source, fluidization, experiment.

For citation: Lobachevsky Ya.P., Pavlov S.A. Infrared drying of seeds in a fluidized bed. *Selskokhozyaistvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. 12(4). 39-43. DOI 10.22314/2618-6748-2018-12-5-39-43. (In Russian).

Инфракрасная (ИК) сушка нашла широкое применение преимущественно в пищевой промышленности [1, 2]. Семена зерновых культур сушат в основном конвективным методом в шахтных, колонковых, бункерных, а также рециркуляционных сушилках [3]. Эти способы сушки малоэффективны, характеризуются низкой производительностью и высокими удельными затратами тепла. Исследования последних лет направлены на совершенствование методов сушки, обеспечивающих наиболее высокую производительность процесса при максимальном сохранении качественных показателей семян. Один из таких методов – комбинированная ИК-сушка [4-7].

Для описания процессов, протекающих в псевдооживленном слое при ИК-сушке, уравнения переноса лучистой энергии следует решать совместно с уравнениями движения и конвективного теплообмена. Для практических расчетов обычно используют принцип независимости конвективного и лучистого потоков друг от друга, что оказывается практически достоверным, если один из них значительно меньше другого. Например, для учета теплоотдачи через излучение рекомендуют суммировать коэффициент теплоотдачи конвекцией, подсчитанный обычным способом, и коэффициент теплоотдачи излучением.

Комбинированные режимы ИК-сушки имеют ряд преимуществ перед конвективной сушкой: быстрый прогрев частиц обеспечивает сокращение длительности процесса, а суммарное воздействие диффузии и термодиффузии способствует перемещению влаги из центра зерновки к периферии и снижает удельные затраты тепла на сушку.

Однако длительное воздействие ИК-излучателей приводит к быстрому повышению температуры, что снижает качественные показатели семян, в первую очередь их всхожесть. Следовательно, не-

обходимо прерывать процесс облучения семян ИК-лучами для воздушного охлаждения. При облучении зерновка нагревается с незначительным испарением влаги, во время обдува охлаждение в результате испарения влаги аккумулированным теплом сопровождается более существенным влагоусором [8, 9].

При комбинированном методе сушки семян период охлаждения является необходимым. Температурный градиент ускоряет подвод влаги к поверхности семян, что может привести к их растрескиванию. Сушку следует проводить при малом градиенте влагосодержания, исключающем появление трещин. Однако прерывание ИК-облучения в аппарате непрерывного действия не всегда экономически целесообразно.

Рассмотрим комбинированный метод сушки при малой интенсивности ИК-потока, но с дополнительным подводом тепла подогретым воздухом при непрерывном облучении.

Цель исследования – разработать математическую модель конвективно-радиационной сушки семян, рассчитать температуру поверхности и мощность ИК-излучателя, параметры подогрева воздуха и выполнить их экспериментальную проверку.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Определим температуру источника ИК-сушки, ниже которой допустима постоянная подача ИК-энергии. При превышении этой температуры необходимо использовать только импульсную подачу. Тепловой поток при ИК-сушке можно записать следующим образом:

$$Q_{\text{л}} = \epsilon_{\text{пр}} \sigma \left[\left(\frac{T_{\text{ис}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{\text{к}}}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2, \quad (1)$$

где $\epsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты; $\sigma = 5,7 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; $T_{\text{ис}}$, $\theta_{\text{к}}$ – температура излучения и конечная температура семян, К.

Допустимое теплосодержание семян в тонком слое, при котором не будет превышена предельно допустимая температура равна:

$$Q_{\text{п}} = 97,3 \text{ Вт/кг.}$$

Соответственно, удельный допустимый тепловой поток для псевдооживленного слоя семян не должен превысить:

$$Q_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{п}}}{f h_i} \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

где H, h_i – высота псевдооживленного слоя и глубина поглощения ИК-энергии семян; f – удельная поверхность семян, $\text{м}^2/\text{кг}$.

Приравняв правые части (1) и (2) получим:

$$T = \sqrt[4]{\frac{Q_{\text{л}} + \varepsilon_{\text{пр}} \sigma \left(\frac{\theta_{\text{к}}}{100} \right)^4}{\varepsilon_{\text{пр}} \sigma}} \cdot 100. \quad (3)$$

Подставляя $T_{\text{ис}}$ в (1) получим мощность ИК-источника:

$$Q_{\text{ис}} = \varepsilon_{\text{пр}} \sigma \left[\left(\frac{T_{\text{ис}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{\text{к}}}{100} \right)^4 \right], \text{ Вт/м}^2. \quad (4)$$

Зависимости $T_{\text{ис}}$ и $Q_{\text{ис}}$ от $\theta_{\text{к}}$ приведены на рисунке 1.

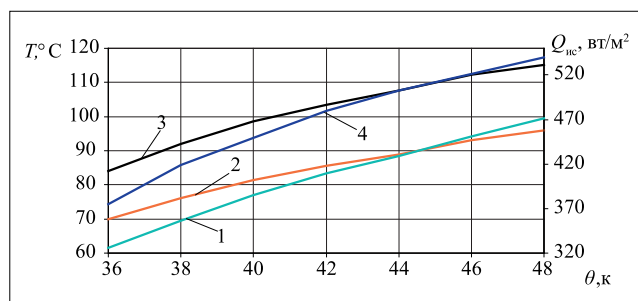


Рис. 1. Зависимость температуры $T_{\text{ис}}$ (1, 4) и мощности ИК-излучателя $Q_{\text{ис}}$ (2, 3) от конечной температуры семян $\theta_{\text{к}}$
Fig. 1. Dependence of the temperature $T_{\text{ис}}$ (1, 4) and the power of the IR emitter $Q_{\text{ис}}$ (2, 3) on the final seed temperature $\theta_{\text{к}}$

Для расчета величины подогрева воздуха при комбинированной сушке вследствие дефицита ИК-мощности предварительно определим коэффициент лучистой теплоотдачи $\alpha_{\text{л}}$:

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{ис}}}{T_{\text{ис}} - \theta_{\text{к}}}, \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (5)$$

Коэффициент теплоотдачи для конвективной сушки семян в псевдооживленном слое можно определить из уравнения [10]:

$$Nu = 0,62 Re^{0,5},$$

где Nu, Re – коэффициенты Нуссельта и Рейнольдса.

Из уравнения (5) получим:

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{Nu \lambda}{d_3},$$

где λ – теплопроводность материала, $\text{Вт/м } ^\circ\text{C}$; d_3 – эквивалентный диаметр семян.

Эквивалентный коэффициент комбинированной ИК-сушки составит:

$$\alpha_3 = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}.$$

Количество тепла, переданного семенам подогретым воздухом, можно записать как:

$$Q_{\text{к}} = \alpha_3 \Delta T + Q_{\text{ис}}, \text{ Вт/м}^2, \quad (6)$$

где ΔT – степень нагрева воздуха, $^\circ\text{C}$.

Из уравнения (6) получим:

$$\Delta T = \frac{Q_{\text{к}} - Q_{\text{ис}}}{\alpha_3}, ^\circ\text{C}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{к}}$ можно записать в виде:

$$Q_{\text{к}} = \frac{\Delta U r H}{f h \eta}, \text{ Вт/м}^2, \quad (8)$$

где ΔU – влагосъем, $\text{кг вл./кг сух. мат}$; r – удельные затраты тепла на испарение влаги, кДж/кг ; η – доля теплоты, пошедшей на испарение влаги.

Зависимость ΔT от влажности семян показана на рисунке 2.

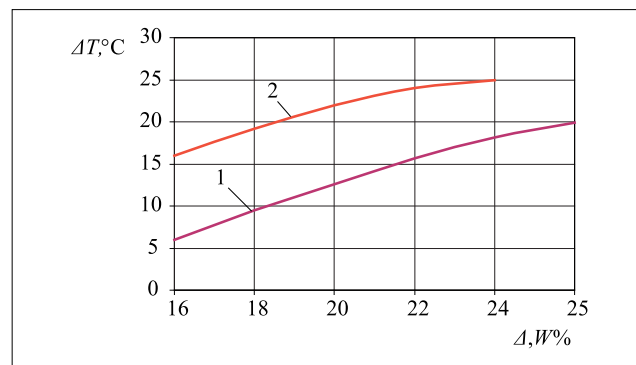


Рис. 2. Зависимость степени подогрева воздуха ΔT от влажности семян: 1 – $H = 0,1$; 2 – $H = 0,18$.
Fig. 2. Dependence of the degree of air heating ΔT on W (the moisture content of seeds): 1 – $H = 0,1$; 2 – $H = 0,18$.

При решении уравнения (7) был сделан ряд допущений, поэтому для проверки достоверности данных формул провели эксперимент. Конструкция лабораторной установки включала цилиндрическую кассету диаметром 0,12 м, ИК-лампу с отражателем мощностью 400 Вт, вентилятор, калорифер для высушивания семян пшеницы наружным и подогретым воздухом при непрерывном воздействии ИК-лучей.

Семена высушивали подогретым воздухом и с отключенной ИК-лампой. Толщина осажженного слоя в опытах составила 0,1 и 0,18 м. Семена увлажняли до 20 и 24%. Скорость агента сушки обеспечивала устойчивое псевдооживление с отношением:

$$K = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{кр}}} = 1,2-1,3,$$

где $V_{\text{п}}$, $V_{\text{кр}}$ – фактическая и критическая скорость агента сушки. В опытах изменяли интенсивность ИК-излучения, степень нагрева и расход воздуха, измеряли температуру поверхности источника и его мощность.

Определив влажность семян и предельно допустимую температуру нагрева по уравнениям (3) и (4), рассчитывали температуру и мощность ИК-источника. Во время эксперимента измеряли влажность и температуру семян каждые 5-10 мин. До и после опыта отбирали семена для проверки их на всхожесть.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. При ИК-сушке семена практически сразу (через 5-10 мин) приобретают температуру, близкую к конечной, в то время как при конвективной сушке прогрев затягивается до 30 мин. Псевдооживление при соотношении

$$K = \frac{V_{\text{п}}}{V_{\text{кр}}} = 1,3$$

позволяет обеспечить удовлетворительное перемешивание семян без выбросов в надслоевую полость. Установлено, что с увеличением высоты псевдооживленного слоя для поддержания заданной температуры семян необходимо повысить температуру и мощность ИК-источника практически пропорционально высоте.

С повышением влажности семян из-за снижения предельно допустимой температуры нагрева снижают температуру и мощность источника. Полученные зависимости влажности W и температуры θ семян при ИК-сушке позволяют судить об эффективности комбинированного режима с подогревом агента сушки. Подогрев агента сушки для зерна влажностью 20% составил 12°C при высоте слоя $H=0,1$ м, а при высоте $H=0,18$ м – 22°C (рис. 3).

Интенсивность ИК-сушки при непрерывной подаче энергии достаточно низкая, для ее интенсификации требуется подогрев воздуха. При расчете степени подогрева воздуха необходимо принять во внимание эквивалентный коэффициент теплоотдачи и дефицит тепла для нагрева семян до нормативной температуры. С учетом этих параметров при известных плотности ИК-потока, конечной температуре семян и толщине слоя можно рассчитать необходимую температуру подогрева наружного воздуха (рис. 2).

График зависимости влажности семян при комбинированной сушке от времени не отличается от

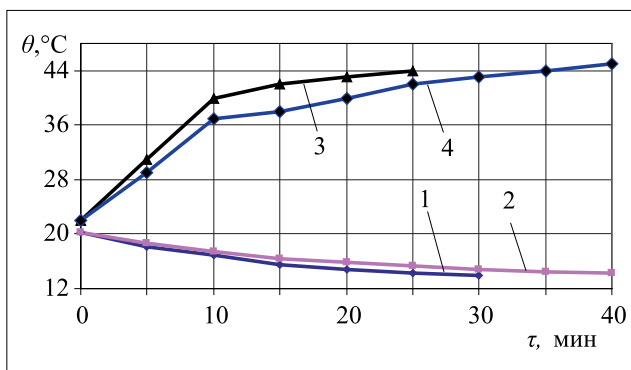


Рис. 3. Зависимость влажности $W(1,2)$ и температуры семян θ_k (3,4) от времени τ при комбинированной сушке: 1,3 – $H=0,1$; 2,4 – $H=1,8$ м

Fig. 3. Dependence of humidity $W(1,2)$ and seed temperature θ_k (3,4) on time τ in combined drying: 1,3 – $H=0,1$; 2,4 – $H=1,8$ m

классического – для конвективной сушки, но температура семян увеличивается быстрее, что является отличительным признаком ИК-сушки (рис. 3).

При сопоставимой температуре нагрева семян максимальная длительность процесса установлена для ИК-сушки, менее длительны процессы конвективной и комбинированной сушки, причем длительность комбинированной на 12% меньше конвективной при полном сохранении качественных показателей семян.

При высушивании семян влажностью 20% с высотой слоя 0,1-0,18 м вклад ИК-энергии в комбинированную сушку составляет 25-30%.

Проведенные экспериментальные работы показали соответствие разработанной модели расчета и температуры мощности ИК-излучателя для комбинированной сушки. Отклонения рассчитанной температуры нагрева семян от действительной не превышают $\pm 10\%$.

Выводы. Температуру поверхности и мощность ИК-излучателя устанавливают в зависимости от высоты слоя, физико-механических и радиологических свойств семян, допустимого теплосодержания и тепла, затраченного на испарение влаги.

Величина степени нагрева воздуха при комбинированной ИК-сушке пропорциональна дефициту мощности ИК-излучателя и обратно пропорциональна эквивалентному коэффициенту теплоотдачи.

Установлено, что экспозиция комбинированной сушки на 12% ниже конвективной за счет интенсификации процесса при полном сохранении качественных показателей семян.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Sagar V.R., Kumar P. Suresh. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review // *J Food Sci Technol*. 2010; 47(1). 15-26.
2. Land van't C.M. Dryin in the Process Industry. First edition. John Wiley & Sons. 2012. 381.
3. Голубкович А.В., Павлов С.А. Совершенствование



технологии сушки семян и зерна повышенной влажности // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2011. N3. С. 21-23.

4. Безбах И.В., Воскресенская Е.В. Повышение энергоэффективности технологической линии с применением комбинированного способа сушки // *Наук. Праці ОНАХТ*. 2008. Вип. 32. С. 86-92.

5. Голубкович А.В., Павлов С.А., Лукин И.Д., Машковцов М.Ф. Расчет параметров осциллирующей сушки зерна в мобильной зерносушилке // *Тракторы и сельхозмашины*. 2013. N5. С. 28-29.

6. Алтухов И.В., Огиров В.Д., Федотов В.А. Определение скорости нагрева топинамбура при сушке инфракрасным излучением // *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2013. N1. С. 14-15.

7. Голубкович А.В., Павлов С.А., Гришин А.А. Исследование изотермического режима сушки семян в реверсивной сушилке // *Механизация и электрификация сель-*

ского хозяйства. 2014. N3. С. 7-9.

8. Рудобашта С.П., Проничев С.А. Организация осциллирующего режима ИК-сушки зерна с помощью информационно-измерительной и управляющей системы // *Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья*. 2006. N8. С. 72-75.

9. Рудобашта С.П., Григорьев И.В. Импульсная инфракрасная сушка семян овощей, нетрадиционных и редких растений // *Промышленная теплотехника*. 2011. N33(8). С. 85-90.

10. Анискин В.И., Окунь Г.С. Технологические основы оценки работы сушильных установок. М.: ВИМ. 2013. 167 с.

11. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Зюлин А.Н. Разработка и внедрение высокоэффективных, ресурсо- и энергосберегающих технологий и технических средств послеуборочной обработки зерна и подготовки семян // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2009. N1. С. 2-9.

REFERENCES

1. Sagar V.R., P. Suresh Kumar. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. *J Food Sci Technol*. 2010. N47(1). 15-26.

2. C.M. van't Land. Drying in the Process Industry. First edition. John Wiley & Sons. 2012. 381.

3. Golubkovich A.V., Pavlov S.A. Sovershenstvovaniye tekhnologii sushki semyan i zerna povyshennoy vlazhnosti [Improving the technology of drying seed and grain of high humidity]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2011. N3. 21-23. (In Russian).

4. BezbaKh I.V., Voskresenskaya Ye.V. Povysheniye energoeffektivnosti tekhnologicheskoy linii s primeneniye kombinirovannogo sposoba sushki [Increasing the energy efficiency of the technological line with application of a combined method of drying]. *Nauk. Pratsi ONAKhT*. 2008. Issue 32. 86-92.

5. Golubkovich A.V., Pavlov S.A., Lukin I.D., Mashkovtsov M.F. Raschet parametrov ostsilliruyushchey sushki zerna v mobil'noy zernosushilke [Calculating the parameters of oscillating grain drying in a mobile grain dryer]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2013. N5. 28-29. (In Russian).

6. Altukhov I.V., Ogirov V.D., Fedotov V.A. Opredeleniye skorosti nagreva topinambura pri sushke infrakrasnym izlucheniye [Determination of the heating rate of Jerusalem artichoke for drying by infrared radiation]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2013. N1. 14-15. (In Russian).

7. Golubkovich A.V., Pavlov S.A., Grishin A.A. Issledovaniye

izotermicheskogo rezhima sushki semyan v reversivnoy sushilke [Studying the isothermal mode of drying seeds in a reversible dryer]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*. 2014. N3. 7-9. (In Russian).

8. Rudobashta S.P., Pronichev S.A. Organizatsiya ostsilliruyushchego rezhima IK-sushki zerna s pomoshch'yu informatsionno-izmeritel'noy i upravlyayushchey sistemy [Arranging the oscillating mode of the infrared drying of grain using an information-measuring and control system]. *Khraneniye i pererabotka sel'skokhozyaystvennogo syr'ya*. 2006. N8: 72-75. (In Russian).

9. Rudobashta S.P., Grigor'yev I.V. Impul'snaya infrakrasnaya sushka semyan ovoshchey, netraditsionnykh i redkikh rasteniy [Impulse infrared drying of seeds of vegetables, non-traditional and rare plants]. *Promyshlennaya teplotekhnika*. 2011. N33(8). 85-90. (In Russian).

10. Aniskin V.I., Okun' G.S. Tekhnologicheskiye osnovy otsenki raboty zasushlivykh ustanovok [Technological basics of assessing the performance of arid installations]. М.: ВИМ. 2013. 163. (In Russian).

11. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Zyulin A.N. Razrabotka i vnedreniye vysokoeffektivnykh, resurso- i energosberegayushchikh tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv posleuborochnoy obrabotki zerna i podgotovki semyan [Development and introduction of highly effective, resource and energy-saving technologies and technical means of post-harvest grain processing and seed preparation]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2009. N1. 2-9. (In Russian).

Статья поступила в редакцию 03.04.2018

The paper was submitted
to the Editorial Office on 03.04.2018

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья принята к публикации 25.05.2018

The paper was accepted
for publication on 25.05.2018

Conflict of interest.

The author declares no conflict of interest.

Определение производительности модулей нового универсального сушильного агрегата

Артем Сергеевич Ключников,
инженер, e-mail: artik8487@mail.ru

Ярославская государственная сельскохозяйственная академия, г. Ярославль, Российская Федерация

Реферат. Сушка семенного материала занимает важное место в системе его послеуборочной обработки и в значительной степени влияет на урожайные качества посевного материала. (*Цель исследования*) Определение производительности двух модулей новой сушилки с учетом статистических характеристик влажности, засоренности и интенсивности поступления на послеуборочную обработку зернового вороха различных культур. (*Материалы и методы*) Провели испытания мини-модуля новой универсальной сушилки, разработанного в мастерских Ярославской государственной сельскохозяйственной академии, в Большесельском районе Ярославской области. За основу расчета взяты данные среднестатистического областного хозяйства. (*Результаты и обсуждение*) Определили, что средний статистический процент влагосъема у исходного зернового вороха составил 10,52 процента; валовой сбор зерна за год – 1500 тонн; расчетная производительность по высушенному семенному материалу у базового модуля равна 5 тонн в час, у мини-модуля – 0,35 тонны в час. С участием Ярославской ГСХА в поточные линии послеуборочной обработки урожая внедрены полностью механизированные приемные отделения с аэрожелобами, вмещающие 300 или 600 кубических метров зернового вороха, поступающего от комбайнов. Расчет эффективности мини-модуля обусловлен необходимостью использования его в хозяйствах для самостоятельного обеспечения высококачественным посевным материалом. (*Выводы*) Подтвердили обоснованность расчетов и эффективность нового способа сушки. В неблагоприятную погоду урожай зерновых культур убирали кормоуборочным комбайном, сушили в мини-модуле. После обработки получили высококачественные семена, всхожесть которых составила 98-99 процентов.

Ключевые слова: сушка, производительность, универсальная сушилка.

■ **Для цитирования:** Ключников А.С. Определение производительности модулей нового универсального сушильного агрегата // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №5. С. 44-48. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-44-48.

Performance Determination of New Universal Dryer Models

Artem S. Klyuchnikov,
engineer, e-mail: artik8487@mail.ru

Yaroslavl State Agricultural Academy, Yaroslavl, Russian Federation

Abstract. Drying of seed material plays an important part in the system of post-harvest processing and greatly affects the yield quality of the seed material. (*Research purpose*) Determination of the performance of two modules of a new dryer, taking into account the statistical characteristics of humidity, impurity content and the intensity of submitting the grain heap of various crops to post-harvest processing. (*Materials and methods*) The research group has tested a mini-module of a new universal dryer developed in the laboratory workshops of Yaroslavl State Agricultural Academy, in the Bolshoye Selo district of the Yaroslavl region. The calculation has been based on the data of the average regional farm. (*Results and discussion*) It has been determined that the average statistical percentage of moisture removal from the original grain heap was 10.52 percent; gross grain harvest per year – 1,500 tons; the estimated capacity by the dried seed material of the base module is 5 tons per hour, that of the mini module - 0.35 tons per hour. Due to the contribution of Yaroslavl State Agricultural Academy, fully mechanized receiving chambers with air chutes accommodating 300 or 600 cubic meters of heap coming from combines have been introduced into the production lines of post-harvest processing of the crop material. The efficiency calculation of the mini-module has been caused by the need to use it on the farms for the independent supply of high-quality seed material. (*Conclusions*) The experiment results have confirmed the validity of the calculations and the effectiveness of the new method of drying. In unfavorable weather, grain crops were harvested by a forage harvester and then dried in a mini-module. After processing, high-quality seeds were obtained, the germination rate of which accounted 98-99 percent.

Keywords: drying, performance, universal dryer.

■ **For citation:** Klyuchnikov A.S. Determination of the performance of new universal dryer modules. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. 12(5). 44-48. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-5-44-48. (In Russian).

Сушка семенного материала занимает важное место в системе его послеуборочной обработки и в значительной степени влияет на урожайные качества посевного материала. Провели расчет производительности двух модулей новой универсальной сушилки, основанный на статистических характеристиках влажности, засоренности и интенсивности поступления зернового вороха на послеуборочную обработку, в условиях различных хозяйств Ярославской области.

Рассмотрели усовершенствованную, низкотемпературную, трехэтапную, конвективную технологию сушки, а также, наметили на перспективу рост производства и урожайности зерна. За основу взяли два модуля – базовый и мини-вариант. Базовый производственный модуль использовали в среднестатистическом сеющем хозяйстве, в котором уборочная площадь на зерно составляет 600 га. Производительность сушильного отделения конкретного хозяйства обеспечивают изменением количества работающих базовых модулей, которые в любых природно-климатических условиях гарантируют получение высококачественных семян. Использование мини-модуля запланировано на сушке урожая семенных масс первых репродукций, получаемых из небольших партий закупленных элитных семян всех культур, посеянных в хозяйстве.

Цель исследования – определение производительности двух модулей новой сушилки с учетом статистических характеристик влажности, засоренности и интенсивности поступления на послеуборочную обработку зернового вороха различных культур. По результатам этих расчетов разработана техническая документация и изготовлен опытный образец макета мини-модуля сушилки.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. Работа выполнена при поддержке гранта, выданного Фондом содействия инновациям, на основе патента номер АААА-Б-217011720078-0. В 2017 г. проведено испытание мини-модуля новой универсальной сушилки на базе филиала ФГБУ «Государственная комиссия Российской Федерации по испытанию и охране селекционных достижений» в Большесельском районе Ярославской области. Результаты испытания подтвердили наши расчеты [2-4].

Результаты и обсуждение. Проведенное лабораторное исследование подтвердило эффективность работы новой конструкции универсальной сушилки и применения улучшенной технологии низкотемпературной, трехэтапной, конвективной сушки [1-3]. Возникла необходимость провести расчеты

производительности новых сушильных камер в условиях среднестатистического зерносеющего хозяйства Ярославской области.

Мини-модуль должен участвовать в сушке семенных масс первой репродукции всех имеющихся в хозяйстве культур, посеянных небольшими партиями элитных семян, закупленных для сортосмены или сортообновления.

Расчеты производительности модулей сушилок должны учитывать основные меняющиеся статистические характеристики разных полевых культур по влажности, засоренности и интенсивности поступления урожая от уборочной техники на послеуборочную обработку [5]. Наша сушилка – универсальная, но расчет ее производительности проведен по урожаю зерновых культур. Производительность сушилки по другим высушиваемым материалам решено определять экспериментально.

Количественные и качественные показатели потока зернового вороха зависят от многих факторов: уровня агротехники, почвенно-климатических условий, температуры и влажности воздуха, количества осадков, продолжительности росы, продолжительности работы в течение суток, тщательности регулировок комбайна, спелости хлебов и других. Эти обстоятельства изменяются как в течение суток, так и во время сезона уборки. Значения влияющих факторов выбраны нами по опубликованным данным, а также по результатам нашего исследования [6-8].

Если рассматривать влажность ω и засоренность s как систему двух случайных величин, каждая из которых распределена нормально, то их плотность распределения можно выразить уравнением:

$$f(\omega, s) = \frac{1}{2\pi \sigma_{\omega} \sigma_s \sqrt{1-r^2}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-r^2)} \left[\frac{(\omega - m_{\omega})^2}{\sigma_{\omega}^2} - \frac{2r(\omega - m_{\omega})(s - m_s)}{\sigma_{\omega} \sigma_s} + \frac{(s - m_s)^2}{\sigma_s^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

где $f(\omega; s)$ – плотность распределения влажности ω и засоренности s зернового вороха; m_{ω} – математическое ожидание влажности вороха; m_s – математическое ожидание засоренности вороха; σ – среднеквадратичное отклонение; r – коэффициент корреляции [9].

По экспериментальным данным обобщенный закон распределения влажности ω и засоренности

с зернового вороха можно описать уравнением плотности распределения вида:

$$f(\omega; s) = \frac{1}{2\pi \cdot 4,47 \cdot 2,00 \sqrt{1 - 0,20^2}} \exp \times \left\{ -\frac{1}{2,00 \cdot (1 - 0,20^2)} \left[\frac{(\omega - 23,88)^2}{4,47^2} - \frac{2 \cdot 0,20(\omega - 23,88)(s - 3,03)}{4,47 \cdot 2,00} + \frac{(s - 3,03)^2}{2,00^2} \right] \right\}. \quad (2)$$

В условиях Ярославской области поступающий от комбайна зерновой ворох характеризуется неравномерностью по влажности и засоренности. Ворох представляет собой механическую смесь различных компонентов. В зависимости от засоренности полей, погоды и качества работы комбайна содержание зерна основной культуры колебалось в пределах 75-98%. Стебли и листья основной культуры и сорняков; семена и соцветия сорных трав и культурных растений; комочки почвы; насекомые в различных стадиях развития; микроорганизмы составляют примеси зернового вороха. Наличие зеленых частей растений, имеющих, как правило, более высокую влажность, отрицательно сказываясь на сохранении зерна в ворохе до его обработки. Микрофлора (бактерии, плесневые грибы, актиномицеты), содержащаяся на зерновках и других компонентах вороха, также оказывала негативное воздействие на его состояние и сохранность.

По результатам эксперимента среднее статистическое значение съема влаги у зернового вороха, требующего сушки, составило 10,52%.

Среднюю величину интенсивности потока зернового вороха G , поступающего от комбайнов на послеуборочную обработку, определяли из уравнения:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} T_i G_i}{\sum_{i=1}^{n_k} T_i}, \quad (3)$$

где G_i – производительность комбайна, т/ч зернового вороха; T_i – продолжительность работы комбайна в сутки, ч; n_k – число комбайнов.

Валовой сбор зерна за год в среднестатистическом хозяйстве Ярославской области равен 1500 т. Агротехнический срок уборки урожая зерновых составляет 20 сут. С участием Ярославской ГСХА в ряде хозяйств области внедрены полностью механизированные приемные отделения в виде наземных емкостей с аэрожелобами, которые вмещают 300 или 600 м³ зернового вороха от комбайнов [9-12].

Эти емкости обеспечивали стабильную работу

машин и оборудования поточной линии и исключали неравномерное поступление урожая от комбайнов. Послеуборочную обработку проводили в две смены продолжительностью по 10 ч каждая при производительности 3,75 т/ч.

В расчетах для определения действительной производительности сушилки (P_c , т/ч) на конкретной культуре пользовались уравнением:

$$P_c = P_{c.p.} k_k k_n k_s k_t \frac{8,72}{(\omega_1 - 11,2)}, \quad (4)$$

где $P_{c.p.}$ – расчетная производительность сушилки – 3,75 т/ч; k_k – коэффициент, учитывающий изменение производительности в зависимости от вида культуры; k_n – коэффициент, учитывающий изменение производительности сушилки от качества зерна. На сушке семян его принимают равным 0,6, но в нашем случае обоснованно выбран $k_n = 1$, так как у нас материал всегда сушат в оптимальном семенном режиме, который исключает реакцию Майнгарда; k_s – коэффициент, отражающий условия эксплуатации сушилки; k_t – коэффициент использования времени смены.

В зависимости от съема влаги производительность сушилки $P_{c.в.}$ рассчитывают по формуле:

$$P_{c.в.} = W_v \frac{100 - \omega_1}{\omega_1 - \omega_2} \quad (5)$$

где ω_1 и ω_2 – начальная и конечная влажность материала, %;

W_v – испарительная способность сушилки по влаге, кг/ч;

$W_v = AV_c$, где A – влагонапряженность сушильной камеры, кг/(м³·ч);

V_c – объем сушильной камеры, м³.

Закон распределения производительности сушилки от W выбран с учетом научных данных и имеет вид:

$$q(P_c) = \frac{1}{P_c^2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{K_c \cdot P_{c.в.}} \sigma_w \sqrt{2\pi}} \times \exp \left[-\frac{\left(\frac{1}{P_c} - \frac{m_w}{K_c \cdot P_{c.в.}} \right)^2}{2\sigma_w^2 \left(\frac{1}{K_c \cdot P_{c.в.}} \right)^2} \right], \quad (6)$$

где $q(P_c)$ – плотность распределения производительности сушилки; K_c – поправочный коэффициент, имеющий постоянную величину для конкретной конструкции сушилки [9].

С учетом увеличения урожайности культур и роста посевных площадей на перспективу у среднестатистического хозяйства выбрали производительность модуля сушильной камеры 5 т/ч по вы-

сушенной готовой продукции. Известно, что использование качественного семенного материала способствует увеличению урожайности зерновых культур в среднем на 25%. В Ярославской области несортowymi семенами засевают около половины площадей, что приводит к снижению валового сбора урожая. Поэтому каждому хозяйству следует самостоятельно обеспечивать себя высококачественным семенным материалом, для чего оно должно ежегодно покупать элитные семена для сортосмены или сортообновления.

У несеменоводческого хозяйства, где под посев высококачественных сортовых семян зерновых культур первой, второй и третьей репродукций отведена площадь около 600 га, по нашим расчетам, ежегодно необходимо закупать порядка 1 т элитных семян на посевную площадь приблизительно 5 га. Высушенный нами среднестатистический урожай вороха семенной массы с этой площади составил около 12,5 т семян, что позволило получить в среднем 6,25 т отсортированных и очищенных семян первой репродукции, которыми засевают площадь в 24 га для получения семян второй репродукции. Почти 1 т семян первой репродукции остается в резервном фонде (это связано с колебаниями урожайности по годам). С 24 га получают 30 т высококачественных семян второй репродукции. Их высевают на площади в 120 га для получения 150 т первоклассных семян третьей репродукции, которые используют для посева на всей оставшейся площади под урожай фуражного зерна. Таким образом, любое хозяйство, имея собственный дешевый высококачественный семенной материал, может повысить валовой сбор урожая на 25%. Хозяйство должно иметь высококачественные семена всех полевых культур – зерновых, кормовых, зернобобовых и других. Сушку небольших партий семян первых репродукций необходимо проводить на отдельной сушилке. Рассчитываем за 36 ч высушить 12,5 т вороха семян разных зерновых культур. Поэтому производительность сушильной камеры мини-модуля составила 0,35 т/ч. Разработанный мини-модуль сушилки позволяет высушить ворох семенной массы первой репродукции всех остальных культур, имеющихся в хозяйстве, в установленные сроки в соответствии с агротехническими требованиями. В неблагоприятную погоду семенной урожай убирают кормоубо-

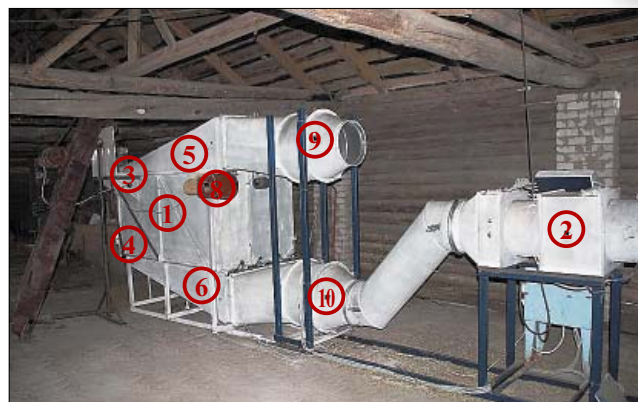


Рис. Мини-модуль универсальной сушилки:

1 – сушильная камера; 2 – электрический калорифер; 3 – загрузочный лоток; 4 – отгрузочный лоток; 5 – верхний диффузор; 6 – нижний диффузор; 7 – загрузочный транспортер; 8 – загрузочный шнек; 9 – нижний вентилятор; 10 – верхний вентилятор

Fig. Mini-module of a universal dryer:

1 – drying chamber; 2 – electric heater; 3 – intake tray; 4 – discharging tray; 5 – upper diffuser; 6 – lower diffuser; 7 – loading conveyor; 8 – intake auger; 9 – lower fan; 10 – upper fan

рочной техникой, а позднее сушат в мини-модуле и обрабатывают.

В 2017 г. мини-модуль сушилки (рис.), изготовленный по разработанной нами технической документации, прошел хозяйственные испытания [1]. Их результаты подтвердили обоснованность наших расчетов и эффективность энергосберегающего, улучшенного, низкотемпературного, трехэтапного, конвективного способа сушки, запатентованного нами.

Выводы

В условиях Ярославской области для среднестатистического зерносеющего хозяйства производительность базового модуля новой универсальной сушилки по высушенному материалу составила 5 т/ч, а у мини-модуля – 0,35 т/ч.

Результаты хозяйственного исследования мини-модуля сушилки подтвердили обоснованность наших расчетов. В неблагоприятную погоду урожай зерновых культур убирали кормоуборочным комбайном. Измельченную хлебную массу сушили в мини-модуле и после этой обработки получили высококачественные семена, всхожесть которых составила 98-99%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ключников А.С. Технология сушки и конструктивные особенности новой универсальной сушилки // Вестник АПК Верхневолжья. 2017. N1. С. 79-85.
2. Андрианов Н.М., Мэй Шунчи, Николаенок А.В., Ли Джен, Чен Джен. Задание начальных условий и стохастической составляющей математической модели процесса сушки зерновых сушилок // Ползуновский альма-

нах. 2014. N2. С. 30-35.

3. Галкин В.Д., Галкин А.Д., Галкин С.В., Менгалиев И.П. Математические модели нормализации зернового вороха по засоренности и влажности и технология его предварительной очистки и сушки // Пермский аграрный вестник. 2014. N3(7). С. 23-33.
4. Оробинский В.И., Шатохин И.В., Парфенов А.Г. Ка-

качества работы зерноочистительного агрегата // Лесотехнический журнал. 2014. N3. С. 256-262.

5. Капов С.Н., Шепелев С.Д. Повышение эффективности зерноуборочного и зерноочистительного процессов согласованием параметров их работы // Достижения науки техники АПК. 2010. N2. С. 76-78.

6. Liu Hui, Zhang Jili, Tang Xiaojian, Lu Yajun. Fuzzy control of mixed-flow grain dryer // Drying Technology. 2003. Vol. 21. pp. 807-819.

7. Istadi I., Sitompul J.P. A comprehensive mathematical and numerical modeling of deep-bed grain drying // Drying Technology. 2002. Vol. 20. 1123-1142.

8. Sitompul J.P., Sumardiono S. Modeling and simulation of momentum, heat, and mass transfer in a deep-bed grain dryer // Drying Technology. 2003. Vol. 21. pp. 217-229.

9. Киреев М.В., Григорьев С.М., Ковальчук Ю.К. По-

слеуборочная обработка зерна в хозяйствах. Л.: Колос. 1981. 224 с.

10. Тарасенко А.П., Оробинский В.И., Гиевский А.М., Мерчалова М.Э. Совершенствование средств механизации для получения качественного зерна // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2012. N3. С. 109-115.

11. Тарасенко А.П., Оробинский В.И., Мерчалова М.Э., Сорокин Н.Н. Совершенствование технологии получения качественных семян и продовольственного зерна // Лесотехнический журнал. 2014. N1. С. 36-39.

12. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Зюлин А.Н. Разработка и внедрение высокоэффективных, ресурс- и энергосберегающих технологий и технических средств послеуборочной обработки зерна и подготовки семян // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2009. N1. С. 2-9.

REFERENCES

1. Klyuchnikov A.S. Tekhnologiya sushki i konstruktivnyye osobennosti novoy universal'noy sushilki [Drying technology and design features of a new universal dryer]. *Vestnik APK Verkhnevolzh'ya*. 2017. 1. 79-85. (In Russian).

2. Andrianov N.M., Mey Shunchi, Nikolayenok A.V., Lee Jen, Chen Jen. Zadaniye nachal'nykh usloviy i stokhasticheskoy sostavlyayushchey matematicheskoy modeli protsessa sushki zernovykh sushilok [Setting the initial conditions and the stochastic component of the mathematical model of the drying process of grain dryers]. *Polzunovskiy al'manakh*. 2014. 2. 30-35. (In Russian).

3. Galkin V.D., Galkin A.D., Galkin S.V., Mengaliyev I.P. Matematicheskiye modeli normalizatsii zernovogo vorokha po zasorenosti i vlazhnosti i tekhnologiya yego predvaritel'noy ochistki i sushki [Mathematical models of grain heap normalization by debris and humidity and the technology of its pre-cleaning and drying]. *Permskiy agrarnyy vestnik*. 2014. 3(7). 23-33. (In Russian).

4. Orobinskiy V.I., Shatokhin I.V., Parfenov A.G. Kachestvennyye pokazateli raboty zernoochistitel'nogo agregata [Qualitative indicators of the operation of a grain cleaning unit]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*. 2014. 3. 256-262. (In Russian).

5. Kapov S.N., Shepelev S.D. Povysheniye effektivnosti zernouboornogo i zernoochistitel'nogo protsessov soglasovaniyem parametrov ikh raboty [Improving the efficiency of grain harvesting and cleaning processes by coordinating their operating parameters]. *Dostizheniya nauki tekhniki APK*. 2010. 2. 76-78. (In Russian).

6. Liu Hui, Zhang Jili, Tang Xiaojian, Lu Yajun. Fuzzy control of mixed-flow grain dryer. *Drying Technology*. 2003.

Vol. 21. 807-819. (In English).

7. Istadi I., Sitompul J.P. A comprehensive mathematical and numerical modeling of deep-bed grain drying. *Drying Technology*. 2002. Vol. 20. 1123-1142. (In English).

8. Sitompul J.P., Sumardiono S. Modeling and simulation of momentum, heat, and mass transfer in a deep-bed grain dryer. *Drying Technology*. 2003. Vol. 21. 217-229. (In English).

9. Kireyev M.V., Grigor'yev S.M., Koval'chuk Yu.K. Posleuborochnaya obrabotka zerna v khozyaystvakh [Post-harvesting grain processing on farms]. Leningrad. Kolos. 1981. 224. (In Russian).

10. Tarasenko A.P., Orobinskiy V.I., Gieyevskiy A.M., Merchalova M.E. Sovershenstvovaniye sredstv mekhanizatsii dlya polucheniya kachestvennogo zerna [Improving the mechanization means to obtain high-quality grain]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012. 3. 109-115. (In Russian).

11. Tarasenko A.P., Orobinskiy V.I., Merchalova M.E., Sorokin N.N. Sovershenstvovaniye tekhnologii polucheniya kachestvennykh semyan i prodovol'stvennogo zerna [Improving the technology of obtaining quality seeds and food grain]. *Lesotekhnicheskii zhurnal*. 2014. 1. 36-39. (In Russian).

12. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Zyulin A.N. Razrabotka i vnedreniye vysokoeffektivnykh, resurso- i energosberegayushchikh tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv posleuborochnoy obrabotki zerna i podgotovki semyan [Development and implementation of high-performance, resource- and energy-saving technologies and technical means of post-harvest grain processing and seed preparation]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2009. 1. 2-9. (In Russian).

Статья поступила в редакцию 23.03.2018

**The paper was submitted
to the Editorial Office on 23.03.2018**

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья принята к публикации 25.05.2018

**The paper was accepted
for publication on 25.05.2018**

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