

Сельскохозяйственные МАШИНЫ и ТЕХНОЛОГИИ

AGRICULTURAL MACHINERY AND TECHNOLOGIES

Том 13 N2 2019

Vol. 13 N2 2019

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

SCIENTIFIC-THEORETICAL JOURNAL

ПРОИЗВОДСТВО МЕТАНА ИЗ ПРОМЫШЛЕННОЙ КОНОПЛИ
METHANE PRODUCTION FROM INDUSTRIAL HEMP

ВНЕСЕНИЕ УДОБРЕНИЙ НА ЛУГАХ И ПАСТБИЩАХ
FERTILIZER APPLICATION IN GRASS LEYS AND PASTURES

СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ
РОБОТИЗИРОВАННЫХ АГРЕГАТОВ
MOTION CONTROL SYSTEMS OF ROBOTIC UNITS





6 мая 2019 года

исполняется 80 лет

АНАТОЛИЮ ИВАНОВИЧУ ЗАВРАЖНОВУ –
*выдающемуся ученому в области механизации
агропромышленного комплекса,
основателю научной школы по механизации
производственных процессов в АПК,
академику Российской академии наук,
Почетному работнику высшего образования,
Заслуженному деятелю науки и техники
Российской Федерации*

Анатолий Иванович Завражнов родился в городе Сорочинск Оренбургской области. С отличием окончил Оренбургский сельскохозяйственный институт. В 1969 г. А.И. Завражнов поступил в аспирантуру Челябинского института механизации и электрификации сельского хозяйства и успешно защитил кандидатскую диссертацию.

После защиты диссертации А.И. Завражнов был приглашен на работу в Казахстан во вновь организованный сельскохозяйственный институт в Целинограде. Им была создана научная школа, внесен большой вклад в развитие теории и методов проектирования машин и технологических линий для приготовления и раздачи кормов на животноводческих фермах и комплексах в системе «человек – машина – животное». С 1969 года он работал в Целиноградском сельскохозяйственном институте заведующим кафедрой, проректором по научной и учебной работе.

В 1985 году А.И. Завражнов переехал в Мичуринск и был назначен на должность ректора Плодоовощного института им. И.В. Мичурина. В 1990 году А.И. Завражнов защитил докторскую диссертацию. В Мичуринске было суждено раскрыться выдающемуся организаторскому таланту и высокому профессионализму Анатолия Ивановича.

В период его руководства институт был преобразован в академию (1994), а впоследствии получил статус Университета (1998). Анатолий Иванович являлся одним из инициаторов преобразования города Мичуринск в наукоград, ему присвоено звание Почетного гражданина Мичуринска.

Под руководством А.И. Завражнова выполнено и защищено несколько десятков кандидатских и докторских диссертаций. Анатолий Иванович – автор более 350 научных работ, патентов, учебников и учебных пособий. Он – лауреат премии Ленинского комсомола, награжден Орденом «Знак Почета», Орденом «Почета», Орденом «За заслуги перед Отечеством» IV степени.

Коллектив Федерального научного агроинженерного центра ВИМ сердечно поздравляет юбиляра и желает академику Анатолию Ивановичу Завражнову крепкого здоровья, благополучия и дальнейших творческих успехов на благо Российской науки!

Директор ФНАЦ ВИМ
академик РАН

А.Ю. Измайлов



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:
В.В. Бижаев,
Л.А. Горелова,
С.В. Гришуткина,
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, 2019

Отпечатано в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
Формат 205 x 290 мм
Подписано в печать 15.04.2019
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-THEORETICAL
JOURNAL

The journal is registered by
Federal Agency for Supervision of
Legislation Observance of Mass
Communications Sphere and
Cultural Heritage Protection
Certificate ПИ No. ФС77-68608
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:

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

Translation into English –
Alekssei 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 15.04.2019
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.), Member 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, Member 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, Member of the Russian Academy of Sciences, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation

Yuriy A. Ivanov

Dr.Sc.(Agr.), Professor, Member 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, Member 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

Tadeusz Pavlovsky

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

Vladimir D. Popov

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

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ**

**Завражнов А.И., Лобачевский Я.П.,
Пустоваров Н.Ю.**
Разработка и обоснование параметров ем-
костного датчика высева семян пропашных
культур4

Будников Д.А.
Определение фактора диэлектрических
потерь зерновоздушной смеси пшеницы ...10

Хаапала Х.
Применение ориентированной на пользова-
теля конструкции и многофакторного
подхода при внедрении инноваций
на примере проектирования
комбинированной сеялки15

**Адамовичс А.М., Ивановс С.А.,
Дубровскис В.С.**
Производство метана из промышленной
конопли20

ЭКОЛОГИЯ

Хеллштедт М.
Использование смеси биоугля и торфа
для снижения интенсивности запаха
от животноводческих ферм27

**Валкама Е., Ранкинен К., Виркаярви П.,
Сало Т., Капуинен П., Туртола Э.**
Внесение азотных удобрений на лугах и
пастбищах: урожайность и риск азотного
выщелачивания31

**Годжаев З.А., Аврамов Д.В., Мартынов Н.В.,
Белоусов Б.Н., Добромиров В.Н.**
Экологическая безопасность транспор-
тно-технологических средств40

ТЕХНИКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОЧВЫ

**Лобачевский Я.П., Лонин С.Э., Алексеев И.С.,
Гончаров Н.Т., Афонина И.И., Ильченко Е.Н.**
Разработка алгоритмов и программного
обеспечения систем управления движением
роботизированного почвообрабатывающего
агрегата48

NEW MACHINERY AND TECHNOLOGIES

**Zavrazhnov A.I., Lobachevskiy Ya.P.,
Pustovarov N.Yu.**
Development and determination of the
parameters of a capacitive seed sowing
sensor for row crops4

Budnikov D.A.
Determination of the dielectric loss factor
of a grain-air mixture of wheat10

Haapala H.
User-centred design and
multi-actor approach
in agricultural innovations – case:
combi drill design15

**Adamovics A.M., Ivanovs S.A.,
Dubrovskis V.S.**
Methane production from
industrial hemp20

ECOLOGY

Hellstedt M.
Use of biochar-peat mixture
to reduce odour from animal
farms27

**Valkama E., Rankinen K., Virkajärvi P., Salo T.,
Kapuinen P., Turtola E.**
Nitrogen fertilization of grass leys:
yield pro-duction and risk
of nitrogen leaching31

**Godzhaev Z.A., Avramov D.V., Martynov N.V.,
Belousov B.N., Dobromirov V.N.**
Ecological safety of transport and
technological vehicles40

MACHINERY FOR SOIL CULTIVATION

**Lobachevskiy Ya.P., Lonin S.E., Alekseev I.S.,
Goncharov N.T., Afonina I.I., Il'chenko E.N.**
Development of algorithms and software
systems for motion control
of a robotic tillage unit48

Разработка и обоснование параметров емкостного датчика высева семян пропашных культур

Анатолий Иванович Завражнов¹,
доктор технических наук, профессор,
академик РАН;

Яков Петрович Лобачевский²,
доктор технических наук, член-корр. РАН;
Никита Юрьевич Пустоваров³,
аспирант, e-mail: nikita.pustovarov@mail.ru

¹Мичуринский государственный аграрный университет, г. Мичуринск, Российская Федерация;

²Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация;

³Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве, г. Тамбов, Российская Федерация

Реферат. Для создания универсальной системы контроля высева семян различных культур необходимы унифицированные датчики. *(Цель исследования)* Разработать датчик высева емкостного типа, теоретически обосновав его конструктивные параметры и место установки датчика на сеялке. *(Материалы и методы)*. Провели теоретические расчеты траекторий полета семян для механического и пневматического высевочных аппаратов с помощью программных комплексов Mathcad и Microsoft Excel при скорости вращения диска высевочного аппарата 11,5; 17,5 и 26,0 оборотов в минуту. Выполнили расчет электрических параметров разрабатываемого датчика высева. Изучили траектории с помощью высокоскоростной съемки высева на экспериментальной установке с последующей обработкой полученных видеоматериалов. Разработали программное обеспечение для лабораторных исследований оптимального угла установки датчика, чтобы минимизировать время пролета семян через чувствительную зону датчика, и как следствие – повысить разрешающую способность датчика. Изучили несколько вариантов установки датчика под различными углами в диапазоне от 0 до 67,5 градуса, с шагом 22,5 градуса. *(Результаты и обсуждение)* Получили геометрические и электрические параметры разрабатываемого датчика высева. Определили оптимальное место и положение установки датчика. *(Выводы)* Выявили, что длина чувствительной зоны датчика составит не менее 55 миллиметров. В ходе лабораторных исследований получили данные, схожие с результатами расчетов. Относительное значение коэффициента сходимости между полученными экспериментально и теоретическими показателями не превышает 0,55 при условии, что данные значения получены на расстоянии, которое меньше радиуса семян. Рассчитали электрические параметры датчика и минимальное расстояние между обкладками датчика, составляющее 20 миллиметров. Установили, что для надежной регистрации отдельных семян высота чувствительной зоны должна быть не менее 5 миллиметров. Создали экспериментальный датчик высева, с помощью которого определили оптимальный угол и место установки датчика. Заключение, что для минимизации времени пролета семян в чувствительной зоне датчика необходимо устанавливать его перпендикулярно траектории полета семян. **Ключевые слова:** посев, высевочный аппарат, частота вращения диска высевочного аппарата, система контроля высева семян, емкостный датчик высева семян.

■ Для цитирования: Завражнов А.И., Лобачевский Я.П., Пустоваров Н.Ю. Разработка и обоснование параметров емкостного датчика высева семян пропашных культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №2. С. 4-9. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-4-9.

Development and Determination of the Parameters of a Capacitive Seed Sowing Sensor for Row Crops

Anatoliy I. Zavrazhnov¹,
Dr.Sc.(Eng.), Professor, Academician of the Russian
Academy of Sciences, e-mail: aiz@mgau.ru;

Yakov P. Lobachevskiy²,
Dr.Sc.(Eng.), Corresponding Member of the Russian
Academy of Sciences, Chief Researcher;
Nikita Yu. Pustovarov³,
postgraduate student, e-mail: nikita.pustovarov@mail.ru

¹Michurinsk State Agrarian University, Michurinsk, Russian Federation;

²Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation;

³All-Russian Research Institute for the Use of Machinery and Oil Products in Agriculture, Tambov, Russian Federation

Abstract. The development of a universal control system requires designing unified seed sowing sensors that allow controlling the sowing of seeds of different crops. (*Research purpose*) To provide theoretical grounds for the determination of parameters and installation location of a capacitive seeding sensor. (*Materials and methods*) In the course of the study, the authors have made theoretical calculations of the seed travel trajectories in mechanical and pneumatic sowing machines using the Mathcad and Microsoft Excel software systems, at various sowing machine frequencies: 11.5; 17.5 and 26.0 revolutions per minute as well as the calculation of the electrical parameters of the designed seeding sensor. Laboratory studies of the trajectory have been performed at the same rotational speeds of the sowing unit disc using high-speed seeding surveys on an experimental installation with subsequent processing of the obtained video materials. The optimum installation angle of the sensor has been experimentally studied from 0 to 67.5 degrees with a pace of 22.5 degrees to minimize the travel time of seeds through the sensitive area of the sensor, and as a result, to increase the sensor resolution using the developed software. (*Results and discussion*) Geometric and electrical parameters of the designed sowing sensor have been obtained, and its optimum location has been determined. (*Conclusions*) In the course of laboratory studies, data similar to the calculation results have been obtained; the relative value of the convergence coefficient between experimentally obtained and theoretical indicators does not exceed 0.55, provided these values are obtained at a distance less than the radius of seeds. The authors have experimentally determined the minimum distance between the sensor plates, which amounts to 20 millimetre, and calculated the electrical parameters of the sensor. They have also stated that the height of the sensitive zone should be at least 5 millimeters for reliable metering of individual seeds under these conditions. The obtained data allowed designing an experimental seeding sensor to determine the optimum angle and the sensor installation site. It has been concluded, that in order to minimize the travel time of seeds in the sensitive area of the sensor, the latter should be installed perpendicularly to the flight trajectory of the seeds.

Keywords: sowing, sowing machine, rotational speed of the disc sowing unit, control system of seeding, capacitive seed sowing sensor.

■ For citation: Zavrazhnov A.I., Lobachevskiy Ya.P., Pustovarov N.Yu. Razrabotka i obosnovanie parametrov emkostnogo datchika vyseva semyan propashnykh kul'tur [Development and determination of the parameters of a capacitive seed sowing sensor for row crops]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N2. 4-9. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-4-9 ((In Russian).

Посев – одна из важнейших агротехнических операций, от которой напрямую зависит урожайность сельскохозяйственных культур. Потери при посеве обусловлены прекращением высева, отклонениями от нормы и равномерности высева, а также от средней глубины заделки семян.

Сплошные посевы характеризуются отсутствием высева одним или несколькими высевающими аппаратами или всей сеялкой во время движения посевного агрегата, которые обнаруживаются только после появления всходов [1-3]. Возможно их устранение пересевом, который требует дополнительных затрат труда и средств, но при этом растения отстают в развитии и снижается урожайность. Сплошные посевы возникают при механических поломках, неправильной регулировке, отсутствии вакуума, отсутствии или сведообразовании семян в бункере, наличии посторонних предметов в массе семян, забивании сошника почвой и составляют примерно 1,5-4,5% площади засеянного поля [4].

Контроль процесса посева с помощью специальной системы, устанавливаемой на пропашных сеялках, позволит снизить потери урожая благодаря оперативному реагированию механизатора на воз-

никающие технологические и технические отказы и своевременному их устранению [5-6]. В ходе анализа систем контроля высева семян и их составных частей, в том числе датчиков высева, было принято решение о проектировании датчиков высева емкостного типа, которые имеют высокие разрешающую способность, чувствительность, работоспособность в условиях сильной запыленности, надежны и доступны по стоимости [7-10].

Цель исследования – разработать датчик высева емкостного типа, теоретически обосновав его конструктивные параметры и место установки на сеялке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. При проведении расчетов траектории пролета семян использованы параметры пневматического и механического высевающего аппарата с диском. Радиус диска с учетом трапецеидального паза равен 102 мм для механического высевающего аппарата и 84 мм – для пневматического. Скорость вращения диска высевающего аппарата составляла 11,5; 17,5 и 26,0 об/мин.

Теоретический расчет траектории полета на примере семян сои без учета сопротивления воздуха проводили по формуле:

$$\begin{cases} x = V_{0x} \cdot t \\ y = -\frac{g \cdot t^2}{2} \end{cases},$$

где V_{0x} – начальная скорость семени, м/с;

t – время, с;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Для более точного определения траектории полета семян необходимо учитывать влияние силы сопротивления воздуха, поэтому система уравнений (1) примет вид:

$$\begin{cases} x = V_{0x} \cdot t - \frac{a_x \cdot t^2}{2} \\ y = \frac{a_y \cdot t^2}{2} - \frac{g \cdot t^2}{2} \end{cases}, \quad (2)$$

где a_x и a_y – ускорения по соответствующим осям, м/с².

Силу сопротивления воздуха определим по формуле:

$$F_{\text{сопр}} = C_x \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S_{\text{мид}}, \quad (3)$$

где $C_x = 0,4$ – коэффициент лобового сопротивления (для семян шарообразной формы),

ρ – плотность воздуха, кг/м³;

V – скорость полета семени, м/с;

$S_{\text{мид}}$ – площадь поперечного сечения семени, м².

После преобразования система уравнений (2) с учетом выражения (3) принимает вид:

$$\begin{cases} x = V_{0x} \cdot t - \frac{C_x \cdot \rho \cdot V_x^2 \cdot S_{\text{мид}} \cdot t^2}{4 \cdot m} \\ y = \frac{C_x \cdot \rho \cdot V_y^2 \cdot S_{\text{мид}} \cdot t^2}{4 \cdot m} - \frac{g \cdot t^2}{2} \end{cases}, \quad (4)$$

где V_x и V_y – скорости движения семян по соответствующим осям, м/с;

m – масса семени, кг.

Выражая начальную скорость семени через частоту оборотов диска высевашего аппарата, получим:

$$\begin{cases} t = -\frac{\sqrt{m^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot r^2 \cdot \pi^2}{900} - C_x \cdot m \cdot \rho \cdot V_y^2 \cdot S_{\text{мид}} \cdot x - m \cdot \frac{\omega \cdot r \cdot \pi}{15}}}{4 \cdot m} \\ y = \frac{C_x \cdot \rho \cdot V_y^2 \cdot S_{\text{мид}} \cdot t^2}{4 \cdot m} - \frac{g \cdot t^2}{2} \end{cases}, \quad (5)$$

где ω – угловая скорость, рад/с;

r – радиус диска высевашего аппарата, м.

В окончательном виде уравнение теоретической траектории полета семени может быть представлено следующим образом:

$$y = \frac{\left(\sqrt{m^2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot r^2 \cdot \pi^2}{900} - C_x \cdot m \cdot \rho \cdot V_y^2 \cdot S_{\text{мид}} \cdot x - m \cdot \frac{\omega \cdot r \cdot \pi}{15}} \right)^2}{128 \cdot m^3} \cdot (C_x \cdot \rho \cdot V_y^2 \cdot S_{\text{мид}} - 4 \cdot m \cdot g) \quad (6)$$

В ходе лабораторных исследований траектории полета семян применяли специальную установку, разработанную в лаборатории «Использование МТА» ФГБНУ ВНИИТиН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. В результате численного эксперимента с использованием выражения (6) получены теоретические траектории полета семян сои в зависимости от частоты вращения диска механического и пневматического высевашего аппарата (рис. 1).

При проведении экспериментов траекторию полета семян, выпавших из ячеек экспериментальных

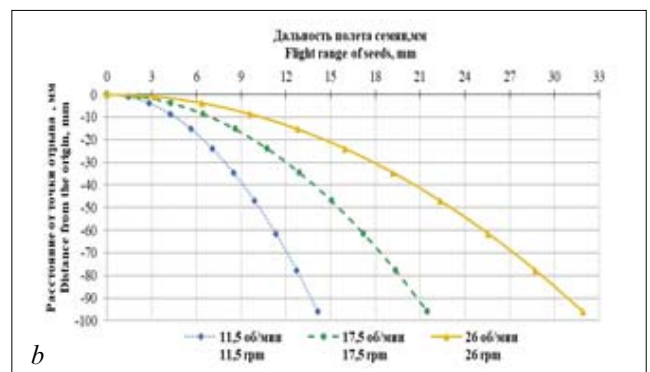
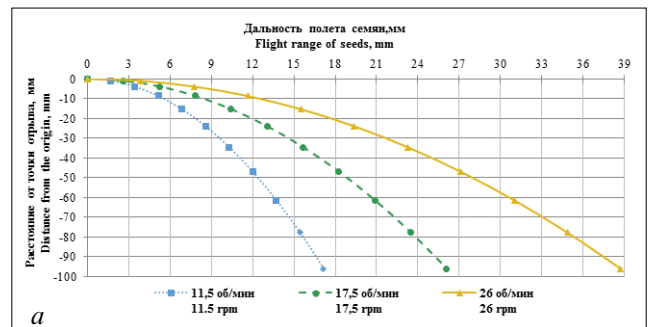


Рис. 1. Теоретические траектории полета семян сои в зависимости от частоты вращения диска:

a – механического высевашего аппарата;

b – пневматического высевашего аппарата

Fig. 1. The trajectory of seeds depending on the air resistance

a – for a mechanical sowing unit

b – for a pneumatic sowing unit

дисков, в зависимости от частоты их вращения изучали на установке с использованием высокоскоростной видеосъемки на камеру GoPro HERO4.

Полученные данные обработали с наложением траектории отдельного семени в разные моменты времени (рис. 2).

Работу над видеоматериалами проводили на ЭВМ по специально разработанной методике, в ре-



Рис. 2. Траектория отдельного семени

Fig. 2. Trajectory of a single seed

зультате которой определяли координаты траектории отдельного семени в конкретный момент времени через чувствительные пластины датчика. Фиксацию координат осуществляли на сетке, нанесенной на листе с шагом 3 мм.

За нулевую точку (0; 0) принимали точку начала выпадения семени из ячейки диска или отрыва семени от отверстия на диске после отсечки вакуума при использовании пневматического высевочного аппарата. Данные о координатах траектории семени заносили в программу для статистической обработки полученной информации *Microsoft Excel*. На основе анализа покадровой обработки данных экспериментов получены графики траектории полета семян в зависимости от частоты вращения механического высевочного диска (рис. 3).

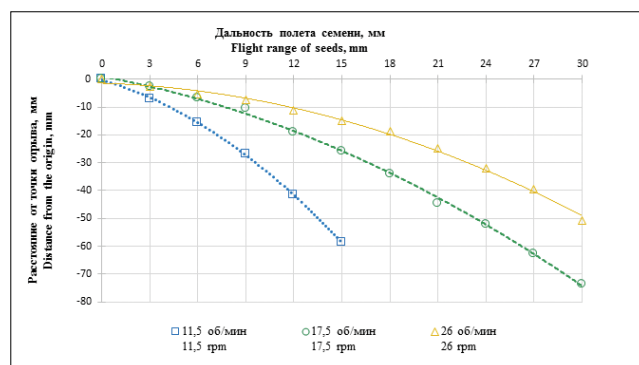


Рис. 3. Траектории полета семян в зависимости от частоты вращения механического высевочного диска (экспериментальные данные)

Fig. 3. Flight path of seeds depending on the frequency of the seed disc rotation

В результате обработки теоретических и экспериментальных данных рассчитаны значения относительной сходимости теоретических и практически полученных значений по каждой точке траектории (табл. 1). Исходя из полученных значений

Дальность полета семян, мм Flight range of seeds, mm	Частота вращения диска высевочного аппарата, об/мин Rotation speed of the seeding disc, rpm		
	11,5	17,5	26
0	0	0	0
3	0,406	0,484	0,550
6	0,173	0,352	0,388
9	0,004	0,186	0,210
12	0,090	0,192	0,115
15	0,184	0,122	0,033
18	-	0,069	0,077
21	-	0,051	0,099
24	-	0,024	0,112
27	-	0,062	0,131
30	-	0,110	0,120

был сделан вывод об адекватности предложенной теоретической модели.

Разрабатываемый датчик высева должен быть универсальным, то есть подходить для определения семян различного размера. Семена люпина обладают самыми большими размерами среди семян пропашных культур, высеваемых в Тамбовской области. Их диаметр в поперечнике может достигать до 15 мм. Соответственно, расстояние между обкладками датчика должно обеспечивать беспрепятственный пролет семян. Поэтому за требуемое минимальное расстояние между обкладками было принято расстояние 20 мм.

Кроме того, при учете минимального расстояния между пластинами датчик должен обеспечивать надежную регистрацию семян самой маленькой фракции.

Емкость конденсатора вычисляют по формуле:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d}, \quad (7)$$

где C – емкость, Ф;

ϵ_0 – электрическая постоянная, Ф/м;

ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м;

S – площадь конденсатора, м²;

d – расстояние между обкладками конденсатора, мм.

Опытным путем установили, что достаточным условием для надежного срабатывания датчика является изменение емкости на 5%.

В ходе расчетов получили следующие параметры датчика: длина чувствительной зоны – 55 мм (с учетом удлинения на 55% для обеспечения контроля в случаях несвоевременного выпадения се-

мян из ячеек), расстояние между пластинами – 20 мм, высота чувствительной зоны – 5 мм. При слишком низкой установке датчика в полости сошника есть вероятность механического повреждения и забивания почвой сошника и, соответственно, датчика. Поэтому датчик следует устанавливать не ниже 50 мм от точки отрыва.

Изменение емкости, происходящее при пролете семян моркови (как семян самой маленькой фракции), согласно формуле (7), составляет 0,008 пФ. При приведенных параметрах изменение емкости будет составлять 6,6%, что является достаточным для надежной регистрации пролета семян через датчик.

Для отображения достоверной информации о норме высева необходимо минимизировать время пролета семени через чувствительную зону датчика. Для этого был изготовлен емкостной датчик высева семян (рис. 4) и проведены исследования, позволяющие судить об оптимальном угле установки датчика в сошнике.

Опыты проводили с датчиком высева, закрепленным на штативе, подключенным к персональ-



Рис. 4. Экспериментальный емкостной датчик высева семян
Fig. 4. Experimental capacitive seed sowing sensor

ному компьютеру через *LPT*-порт с помощью разработанного ПО, обрабатывающего сигнал с дат-

чика высева и позволяющего определить протяженность импульса, возникающего при пролете семени через датчик с точностью до одной миллисекунды. Повторность опыта 300-кратная для каждой культуры и для каждого угла установки датчика. Угол изменяли от 0° до 67,5° с шагом в 22,5° (табл. 2).

Высокое значение коэффициента вариации обусловлено большой разницей формы, размеров и массы среди семян одной культуры.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о соответствии экспериментальных данных теоретическим исследованиям и возможности использования предложенных зависимостей для различных расчетов.

Разработали датчик высева семян емкостного типа, определили его параметры и оптимальное место его установки – полость сошника, поскольку для расчета текущих параметров высева необходимо контролировать процесс высева максимально близко к выходу системы.

В данном случае длина чувствительной зоны, с учетом запаса, например на застревание семени в ячейке высевающего диска, должна составлять 55 мм, расстояние между обкладками датчика – 20 мм, высота чувствительной зоны – 5 мм с учетом электрических параметров датчика, высота установки – не ниже 50 мм от точки отрыва. Для минимизации времени пролета семян через чувствительную зону датчика его следует устанавливать в полости сошника горизонтально.

Таблица 2				Table 2				
ЗАВИСИМОСТЬ СРЕДНЕГО ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА СЕМЯН РАЗЛИЧНЫХ КУЛЬТУР ОТ УГЛА УСТАНОВКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ЗОНЫ ДАТЧИКА RELATIONSHIP BETWEEN THE AVERAGE TRAVEL TIME OF SEEDS AND THE INSTALLATION ANGLE THE SENSITIVE ZONE OF THE SENSOR								
Культуры Crops	0°		22,5°		45,0°		67,5°	
	Среднее время, мс Average time, ms	Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	Среднее время, мс Average time, ms	Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	Среднее время, мс Average time, ms	Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %	Среднее время, мс Average time, ms	Коэффициент вариации, % Coefficient of variation, %
Люпин Lupine	14,03	14,23	18,51	6,28	19,92	9,87	22,59	7,53
Кукуруза Corn	12,38	9,18	13,99	5,88	18,53	9,71	20,11	7,03
Свекла Beetroot	8,95	9,47	11,03	7,44	12,11	11,35	16,04	8,94
Соя Soybean	11,98	6,97	13,04	6,23	14,53	7,41	17,02	4,93
Подсолнечник Sunflower	12,38	13,32	15,69	10,92	17,85	11,17	20,91	7,14
Горох Peas	14,93	17,66	16,62	13,48	18,07	13,86	19,93	14,08
Морковь Carrot	8,04	10,14	8,96	9,51	9,46	11,40	10,50	10,61



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Gebbers R., Adamchuk V. Precision Agriculture and Food Security. *Science*. 2010. 327(5967). 828-831.
2. Руденко В.П. Полтавская технология посева. Полтава: Копи-Центр. 2013. 54 с.
3. Bauckhage C., Kersting K. Data Mining and Pattern Recognition in Agriculture. *Künstliche Intelligenz*. 2013. N27(4). 313-324.
4. Балашов А.В., Стрыгин С.П., Синельников А.А., Пустоваров Н.Ю., Хайруллина С.Г. Исследование контролируемого гнездового посева семян сои // *Наука в центральной России*. 2017. №6. С. 6-17.
5. Завражных А.И., Балашов А.В., Стрыгин С.П., Крищенко А.В., Пустоваров Н.Ю. Система контроля высева семян // *Сельский механизатор*. 2017. №12. С. 18-21.
6. Колчина Л.М. Автоматические системы технологического контроля посевной техники // *Техника и оборудо-*

- дование для села*. 2014. №3. С. 6-9.
7. Бочагин А.И. Регистрация посевного материала в семяпроводе пьезорезонансным датчиком высева // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2012. Т. 7. N2(24). С. 49-52.
8. Зазуля А.Н., Балашов А.В., Белогорский В.П. Энергосберегающая технология возделывания сахарной свеклы // *Наука в центральной России*. 2015. N3(15). С. 117-126.
9. Несмиян А.Ю., Ценч Ю.С. Тенденции и перспективы развития отечественной техники для посева зерновых культур // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. N3. С. 45-52.
10. Бейлис В.М., Ценч Ю.С., Коротченя В.М., Старовойтов С.И., Кынев Н.Г. Тенденции развития прогрессивных машинных технологий и техники в сельскохозяйственном производстве // *Вестник ВИЭСХ*. 2018. N4(33). С. 150-156.

REFERENCES

1. Gebbers R., Adamchuk V. Precision Agriculture and Food Security. *Science*. 2010. 327(5967). 828-831 (In English).
2. Rudenko V.P. Poltavskaya tekhnologiya poseva [Poltava seeding technology]. Poltava: Izd-vo OOO "Kopi-Tsentr". 2013. 54 (In Russian).
3. Bauckhage C., Kersting K. Data Mining and Pattern Recognition in Agriculture. *Künstliche Intelligenz*. 2013. N27(4). 313-324 (In English).
4. Balashov A.V., Strygin S.P., Sinel'nikov A.A., Pustovarov A.Yu., Khayrullina S.G. Issledovaniye kontroliruemogo gnezdovogo poseva semyan soi [Study of a controlled cluster sowing of soybean seeds]. *Nauka v tsentral'noy Rossii*. 2017. №6. 6-17 (In Russian).
5. Zavrzhnyov A.I., Balashov A.V., Strygin S.P., Krishchenko A.V., Pustovarov N.Yu. Sistema kontrolya vyseva semyan [Control system of seeding]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2017. №12. 18-21 (In Russian).
6. Kolchina L.M. Avtomaticheskiye sistemy tekhnologicheskogo kontrolya posevnoy tekhniki [Automatic systems of the technological control of sowing equipment]. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2014. №3. 6-9 (In Russian).

7. Bochagin A.I. Registratsiya posevnogo materiala v seymaprovede p'yezorezonansnym datchikom vyseva [Seed metering in a seed drill tube with a piezo-resonance seeding sensor]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2012. Vol. 7. N2(24). 49-52 (In Russian).
8. Zazulya A.N., Balashov A.V., Belogorskiy V.P. Energo-sberegayushchaya tekhnologiya vozdeleyvaniya sakharnoy svekly [Energy saving technology of sugar beet cultivation]. *Nauka v tsentral'noy Rossii*. 2015. №3 (15). 117-126 (In Russian).
9. Nesmiyan A.Yu., Tsench Yu.S. Tendentsii i perspektivy razvitiya otechestvennoy tekhniki dlya poseva zernovykh kul'tur [Trends and prospects of development of domestic equipment for sowing grain crops]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. T. 12. №3. 45-52 (In Russian).
10. Beylis V.M., Tsench Yu.S., Korotchenya V.M., Starovoytov S.I., Kynev N.G. Tendentsii razvitiya progressivnykh mashinnykh tekhnologiy i tekhniki v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Trends in the development of advanced machine technologies and techniques in agricultural production]. *Vestnik VIESH*. 2018. N4(33). 150-156 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 11.02.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 11.02.2019

Статья принята к публикации 10.04.2019
The paper was accepted
for publication on 10.04.2019

Определение фактора диэлектрических потерь зерновоздушной смеси пшеницы

Дмитрий Александрович Будников,
кандидат технических наук, ведущий научный
сотрудник, e-mail: dimm13@inbox.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Показали, что энергоемкость процессов тепловой обработки зерна после уборки зависит как от стоимости энергоносителей, так и от связи влаги в зерне. Выявили, что снизить себестоимость указанных процессов можно, используя электротехнологии, в частности электромагнитные поля. При разработке режимов обработки необходимо учитывать виды применяемых электротехнологий, таких как инфракрасные поля, поля сверхвысокой частоты. (*Цель исследования*) Определить зависимость коэффициента диэлектрических потерь зерновоздушной смеси от влажности пшеницы (в диапазоне 11-30 процентов) при плотности слоя 220-660 килограммов на кубический метр. (*Материалы и методы*) Привели схему лабораторной установки. Выполнили экспериментальные исследования по определению фактора диэлектрических потерь псевдоожиженного слоя зерна пшеницы. (*Результаты и обсуждение*) Провели двухфакторный эксперимент по определению влияния влажности и плотности зерновой насыпи на фактор диэлектрических потерь, который позволяет установить поглощаемую от микроволнового источника мощность. Получили искомые зависимости. (*Выводы*) Выявили, что коэффициент диэлектрических потерь при влажности зерна 11-30 процентов находится в диапазоне 0,18-0,42 для плотного зернового слоя 660 килограммов на кубический метр; 0,06-0,15 – для псевдоожиженного слоя (440 килограммов на кубический метр); 0,1-0,3 – для взвешенного (220 килограммов на кубический метр). Установили зависимость коэффициента диэлектрических потерь зерно-воздушного слоя пшеницы от влажности зерна и плотности слоя, описали ее полиномиальной моделью второй степени. Показали, что псевдоожижение зернового слоя повышает эффективность воздействия микроволнового поля, так как вследствие снижения коэффициента диэлектрических потерь увеличивается глубина проникновения поля в слой. Рекомендовали применять микроволновое поле в плотном слое зерна при досушивании пшеницы, уменьшая влажность с 16 до 14 процентов.

Ключевые слова: микроволновое поле, тепловая обработка зерна, коэффициент диэлектрических потерь, напряженность поля, моделирование электромагнитных полей, псевдоожиженный слой зерна.

■ **Для цитирования:** Будников Д.А. Определение фактора диэлектрических потерь зерновоздушной смеси пшеницы // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №2. С. 10-14. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-10-14.

Determination of the Dielectric Loss Factor of a Grain-Air Mixture of Wheat

Dmitriy A. Budnikov,
Ph.D.(Eng), key research engineer,
e-mail: dimm13@inbox.ru

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper presents the data on the energy intensity of the heat treatment of grain during post-harvest processing caused by both the cost of energy and the grain moisture content. The development of processing modes using electrical technologies, in general, and electromagnetic fields, in particular, can make it possible to reduce the cost of these processes. Heat treatment is applied to the grain of various crops at the stages of drying, disinfection, preparation for feeding, etc. When developing them, it is necessary to take into account the types of applied electrical technologies, such as, for example, infrared fields, microwave fields, etc. (*Research purpose*) To determine the dielectric properties (dielectric loss coefficient) of a wheat grain-air mixture with a moisture content of 11-30 percents with a layer density of 220-660 kilogram per cubic meter. (*Materials and methods*) The authors present a diagram of a laboratory installation, carried out experimental studies to determine the dielectric loss coefficient of a fluidized bed of wheat grain. (*Results and discussion*) The authors conducted

a two-factor experiment to determine the effect of moisture and density of a grain bulk on the dielectric loss factor, which determines the power absorbed from the microwave source. As a result, they obtained the studied relationships. (Conclusions) It was found that the dielectric loss coefficient at a grain moisture content of 11-30 percents is in the range of 0.18-0.42 for a dense grain bed of 660 kilogram per cubic meter, 0.06-0.15 for a fluidized bed (440 kilogram per cubic meter); and for a weighted bed (220 kilogram per cubic meter) 0.1-0.3. The authors calculated a dependence of the dielectric loss coefficient of a wheat grain-and-air layer on the grain moisture content and the layer density, which can be described by a polynomial model of a second power. The study showed that fluidization of the grain bed increases the efficiency of the microwave field, as due to a decrease in the dielectric loss coefficient, the depth of field penetration into the layer increases. It is recommended to use the microwave field in a dense bed of grain when drying wheat, thus reducing moisture from 16 to 14 percent.

Keywords: microwave field, heat treatment of grain, dielectric loss coefficient, field strength, electromagnetic field modeling, fluidized bed of grain

For citation: Budnikov D.A. Opredelenie faktora dielektricheskikh poter' zernovozdushnoy smesi pshenitsy [Determination Of The Dielectric Loss Factor Of A Grain-Air Mixture Of Wheat]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N2. 10-14. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-10-14 (In Russian).

Классические тепловые способы сушки зерна отличаются высокой энергоемкостью (3,5-9,0 МДж/кг_{исп.вл.}), а установки для сушки зерна зачастую физически изношены и не отвечают современным требованиям энергосбережения [1-4]. Способы усовершенствования конструкций зерносушилок исчерпаны, требуется разработка технологий и оборудования, обеспечивающего высокотехнологичную, энергосберегающую сушку. При расходе теплоты в зерносушилке учитываются следующие затраты и потери теплоты: на испарение влаги; на нагрев зерна; с отходящими газами (с отработавшим агентом сушки); в окружающую среду (через нагретые поверхности); на нагрев транспортных средств; вследствие неполного сгорания топлива (от механического и химического недожога).

Затраты теплоты на испарение влаги определяют по формуле:

$$Q_1 = W(r + \Delta r), \quad (1)$$

где W – влажность, о.е.;

r – скрытая теплота парообразования воды, кДж/кг_{вл.};

$$r = 2500 - (2,3 + 0,0014 \cdot \theta)\theta; \quad (2)$$

θ – температура зерна, °C.

Основные способы снижения энергоемкости сушки следующие:

- повышение температуры сушильного агента и увеличение его расхода (интенсификация);
- сушка неподогретым воздухом в бункерах-зернохранилищах;
- герметизация и термоизоляция сушилки, каналов и воздуховодов;
- регенерация тепла из отработанного теплоносителя (существенное снижение энергоемкости; снижение скорости сушки);

- наложение неоднородных электрических полей (снижение производительности);
- исключение охлаждающих устройств из сушильных агрегатов (драйрация);
- предварительный подогрев зерна (увеличение энергоемкости установки);
- рециркуляция отработанного теплоносителя (усложнение конструкции);
- применение электромагнитных ВЧ- и СВЧ-полей (повышение требований безопасности персонала; увеличение энергоемкости установки; усложнение конструкции);
- сушка озонородушной смесью (повышение требований безопасности персонала; усложнение конструкции; повышенный износ из-за окисления металлических частей).

Для увеличения производительности сушильного оборудования часто используют разрыхление обрабатываемого слоя тем или иным способом (заторможенный, падающий, псевдооживленный, восходящий слой и т.д.). Одним из вариантов интенсификации тепломассопереноса в псевдооживленном слое может быть применение электромагнитного поля микроволнового диапазона. Экспериментальные исследования позволяют судить об эффективности подобной комбинации [4, 5]. Например, энергоэффективность сушки сои зависит от толщины обрабатываемого слоя, скорости агента сушки, его температуры и удельной мощности воздействующего электромагнитного поля (рис. 1) [5]. Энергоэффективность сушки представляет собой отношение полезной мощности, идущей на испарение влаги, к общей затраченной мощности. Анализ приведенных графиков позволяет сравнить влияние различных факторов: температуры агента сушки (рис. 1а), скорости агента сушки (рис. 1б), толщины слоя (рис. 1с) с применением микроволнового поля при различной удельной мощности (рис. 1д).

При этом увеличение удельной мощности электромагнитного поля ограничивается технологическими параметрами процесса тепловой обработки.

В общем же случае энергетические затраты на сушку зерна в зависимости от состояния слоя или технологии для наглядности сравнения принято выражать через критерий сушки, или критерий эффективности влагосъема. Он учитывает взаимосвязь исходной и текущей влажности в расчете на массу сухого вещества зерна, а также количество удаляемой из зерна влаги. Критерий эффективности влагосъема в соответствии с технологией сушки зависит от многих факторов, в том числе от температуры и скорости агента сушки, его массовой доли, продолжительности сушки, влажности обрабатываемого материала, удельной мощности, рассеиваемой в материале, концентрации и полярности аэроионов, напряженности электрического поля и т.д. При этом степень влияния указанных факторов различна для разных видов технологии сушки. Так, в случае сушки в шахтной сушилке определяющим критерием будет продолжительность сушки (за счет изменения формы связи влаги), в случае же сушки в элементарном слое усиливается влияние изменения массовой доли агента сушки и в диапазоне $0,36-1,35 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ изменяется от 0 до 0,11 [5]. При этом коэффициент сушки практически не зависит от температуры агента сушки и массовой доли агента сушки при сушке в кипящем слое. Это связано с большой площадью соприкосновения агента сушки и обрабатываемого материала, а также с тем, что агент сушки не успевает насытиться парами влаги, содержащейся в обрабатываемом материале.

Для разработки энергоэффективного оборудования и алгоритмов управления зерносушильным оборудованием необходимо знать диэлектрические характеристики материала, находящегося в разном состоянии слоя (плотный, псевдооживленный, взвешенный) [7-9]. Определение таких характеристик, как фактор диэлектрических потерь, сопряжено со сложностями, обусловленными неравномерностью распределения влаги по материалу, наличием воздушных промежутков, а также необходимостью обеспечения требуемой плотности слоя.

Цель исследования – определить зависимость коэффициента диэлектрических потерь зерно-воздушной смеси от влажности пшеницы в слоях различной плотности.

Материалы и методы. Исследование тепловой обработки зерновой массы, в том числе находящейся в псевдооживленном и кипящем состоянии, проводили на лабораторной установке (рис. 2).

Для экспериментального определения напряженности электромагнитного поля в зерновом слое применяли устройство, которое работает по прин-

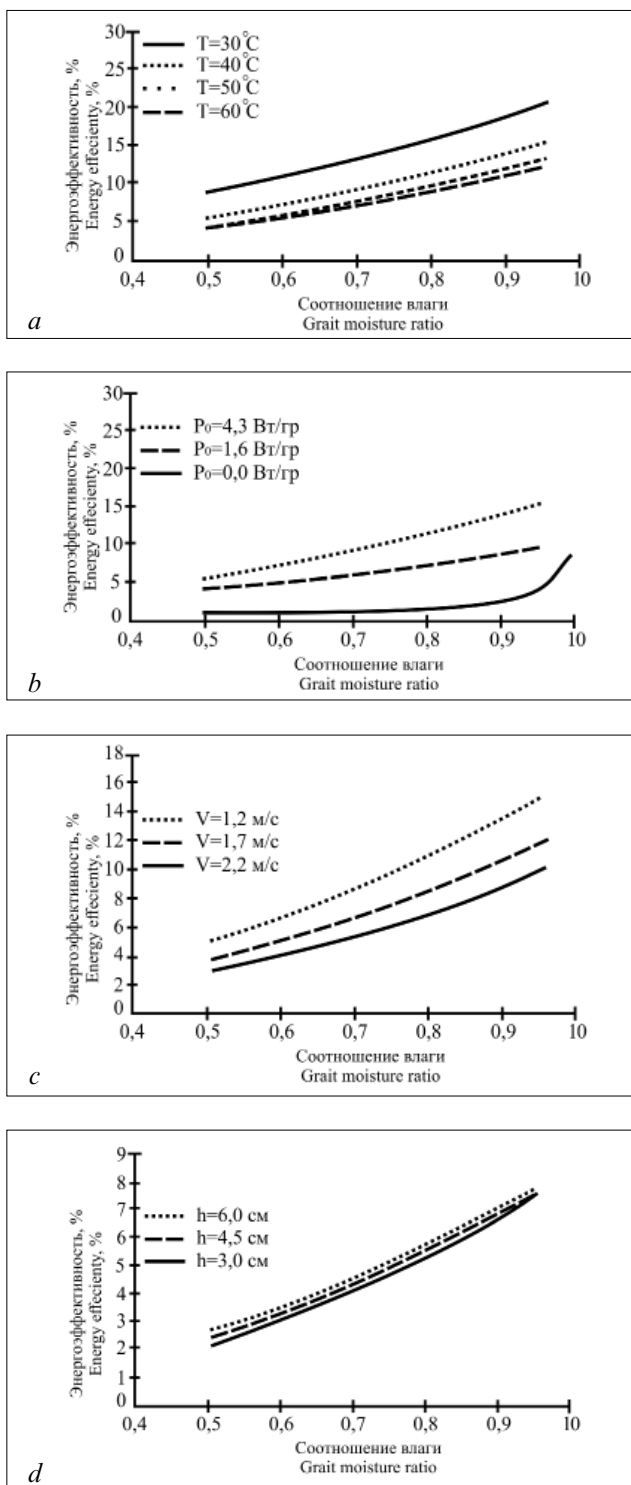


Рис. 1. Энергоэффективность сушки зерна сои в псевдооживленном слое с применением электромагнитного поля СВЧ
Fig. 1. Energy efficiency of grain drying in the fluidized bed using microwave electromagnetic field

ципу калориметрического измерительного оборудования [8, 9]. Калориметрический метод измерения основан на преобразовании энергии электромагнитных колебаний в тепловую. Поглощение энергии поглотителем, составляющим основной элемент прибора, можно зарегистрировать либо

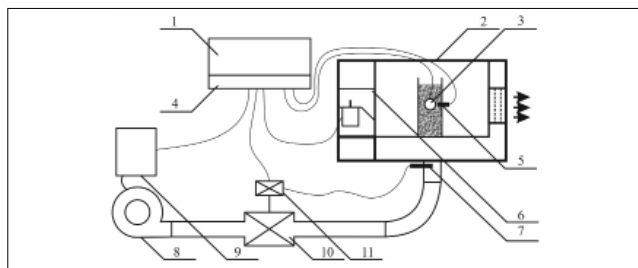


Рис. 2. Лабораторная установка для исследования тепловой обработки зерновой массы:

1 – ПК; 2 – зона СВЧ-конвективной обработки; 3 – калориметрический датчик; 4 – плата ввода/вывода; 5 – датчик температуры зернового слоя; 6 – источник СВЧ (магнетрон, блок питания, волновод); 7 – датчик температуры воздуха; 8 – вентилятор; 9 – векторный преобразователь частоты; 10 – нагреватель; 11 – терморегулятор

Fig. 2. Laboratory installation for the study of heat treatment of a grain mass: 1 – PC; 2 – microwave convection processing zone; 3 – calorimetric sensor; 4 – input/output board; 5 – grain layer temperature sensor; 6 – microwave source (magnetron, power supply, waveguide); 7 – air temperature sensor; 8 – fan; 9 – vector frequency converter; 10 – heater; 11 – thermostat

непосредственно по динамике его температуры, либо косвенно – по изменению объема, давления или других характеристик. В данном случае происходит контроль температуры [6].

Возможна реализация нагрузки (зернового слоя) как при полном, так и при частичном заполнении объема зоны СВЧ-конвективной обработки [10]. Обеспечение состояния псевдооживленного либо взвешенного слоя осуществляется посредством продувания через слой воздуха с требуемой скоростью от вентилятора. Скорость потока воздуха регулируется через векторный преобразователь частоты.

Мощность, поглощенную в единице объема диэлектрика, определим по формуле:

$$P = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2, \quad (3)$$

где P – поглощенная мощность, Вт/м³;

f – частота электромагнитного поля, Гц;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума ($8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);

ε'' – фактор диэлектрических потерь;

E – напряженность электрического поля, В/м.

Измерение напряженности электромагнитного поля в слое материала контролируется устройством, разработанным и представленным ранее [6]. Коэффициент диэлектрических потерь определяют аналитически по зависимости:

$$\varepsilon'' = \frac{c_m \cdot \rho_m \cdot \Delta T}{5,56 \cdot 10^{-11} \cdot E_2 \cdot f \cdot \tau}, \quad (4)$$

где c_m – теплоемкость материала, кДж/кг·°С;

ρ_m – плотность сухого вещества образца, кг/м³;

ΔT – нагрев материала в процессе измерения, °С.

Контроль температуры в зерновке осуществляется встроенной термопарой.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. Напряженность электромагнитного поля в зерно-воздушной смеси пшеницы измерили в слоях различной плотности: 220 кг/м³, что характерно для взвешенного слоя; 440 кг/м³ – для псевдооживленного и 660 кг/м³ – для обычного плотного слоя (рис. 3). Зависимость коэффициента диэлектрических потерь для зерна при влажности 11-30% может быть описана полиномиальной моделью.

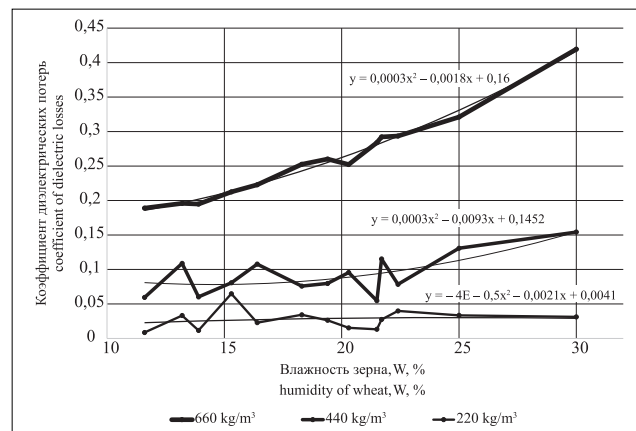


Рис. 3. Зависимость коэффициента диэлектрических потерь от плотности слоя и влажности зерна пшеницы

Fig. 3. Dependence of the dielectric loss coefficient on the wheat grain bed density and moisture content

Общая динамика фактора диэлектрических потерь для зерна пшеницы, на которое воздействует электромагнитное поле СВЧ частотой 2,45 Гц, сохраняется для разных значений плотности материала. Но уровни этого коэффициента заметно различаются. Так, для плотного слоя коэффициент диэлектрических потерь изменяется в диапазоне 0,18-0,42; для псевдооживленного слоя – 0,06-0,15; для взвешенного – 0,1-0,3. Зависимость диэлектрических свойств может быть описана полиномиальной моделью.

Достоверность данных для разных уровней плотности существенно отличается, так как в плотном слое погрешность обусловлена применяемыми датчиками, а также наличием воздушных промежутков в слое; для псевдооживленного и взвешенного слоев, помимо указанных, добавляются потери, обусловленные тепловым взаимодействием воздуха с зерновым слоем и датчиком. Качество измерений можно повысить, если использовать датчики, на которые не действует микроволновое поле, например, оптоволоконные, или механически воздействуя на слой. В дальнейшем необходимо составить уравнение энергетического баланса и провести оценку энергоемкости влагосяема с учетом энергии, идущей на создание соответствующей плотности слоя, расходуемой на электромагнитное воздействие, перемещение материала и т.д.

Выводы

1. Коэффициент диэлектрических потерь при влажности зерна 11-30% находится в диапазоне 0,18-0,42 для плотного зернового слоя (660 кг/м^3); 0,06-0,15 – для псевдооживленного слоя (440 кг/м^3); 0,1-0,3 – для взвешенного (220 кг/м^3).

2. Зависимость коэффициента диэлектрических потерь зерно-воздушного слоя пшеницы может быть описана полиномиальной моделью второй степени.

3. При выборе путей интенсификации и обеспечения энергосбережения следует руководствоваться

ключевыми требованиями технологических процессов и экономическими критериями эффективности производства.

4. Псевдооживление зернового слоя повышает эффективность применения микроволнового поля, при этом вследствие снижения коэффициента диэлектрических потерь увеличивается глубина проникновения поля в слой.

5. Микроволновое поле следует применять в плотном слое зерна при досушивании пшеницы, уменьшая влажность с 16 до 14%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малин Н.И. Энергосберегающая сушка зерна. М.: Колос. 2004. 240 с.
2. Nelson S.O. Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications. Academic Press. 2015. 229.
3. Малин Н.И. Технология хранения зерна. М.: Колос. 2005. 280 с.
4. Vasilev A.N., Budnikov D.A., Ospanov A.B., Karmanov D.K., Karmanova G.K., Shalginbaev D.B., Vasilev A.A. Controlling reactions of biological objects of agricultural production with the use of electrotechnology. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8. Issue N4. 26855-26869.
5. Ranjbaran M., Zare D. Simulation of energetic- and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans. *Energy*. 2013. Vol. 59. 484-493.
6. Будников Д.А. Определение коэффициента диэлек-

трических потерь псевдооживленного слоя зерна // *Инженерный вестник Дона*. 2017. N3. С. 1-9.

7. Budnikov D.A., Vasilev A.N., Ospanov A.B., Karmanov D.K., Dautkanova D.R. Changing parameters of the microwave field in the grain layer. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. N11 (Special Issue 1). 2915-2919.

8. Pallai-Varsányi E., Neményi M., Kovács A.J., Szijjártó E. Selective Heating of Different Grain Parts of Wheat by Microwave Energy. *Advances in Microwave and Radio Frequency Processing*. 2007. 312-320.

9. Будников Д.А. Измерение напряженности СВЧ поля в зерновом слое // *Вестник ВИЭСХ*. 2015. N4(21). С. 40-44.

10. Будников Д.А. Промежуточные результаты численного эксперимента по СВЧ нагреву пшеницы разной плотности // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2017. N2(23). С. 22-28.

REFERENCES

1. Malin N.I. Energy-saving drying of grain [Energoberegayushchaya sushka zerna]. Moscow: Kolos. 2004. 240 (In Russian).
2. Stuart Nelson Dielectric Properties of Agricultural Materials and Their Applications Academic Press. 2015. 229 (In English).
3. Malin N.I. Technology of grain storage [Tehnologiya khraneniya zerna]. Moscow: Kolos. 2005. 280 (In Russian).
4. Vasilev A.N., Budnikov D.A., Ospanov A.B., Karmanov D.K., Karmanova G.K., Shalginbaev D.B., Vasilev A.A. Controlling reactions of biological objects of agricultural production with the use of electrotechnology. *International Journal of Pharmacy and Technology*. 2016. Vol. 8. Issue N4. 26855-26869 (In English).
5. Ranjbaran M., Zare D. Simulation of energetic- and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans. *Energy*. 2013. Vol. 59. 484-493 (In English).
6. Budnikov D.A. Determination of the coefficient of dielectric losses of the fluidized grain layer [Opredelenie koeffitsienta dielektricheskikh poter' psevdoozhizhennogo sloya zerna].

Inzhenerniy vestnik Dona. 2017. N3. 1-9 (In Russian).

7. Budnikov D.A., Vasilev A.N., Ospanov A.B., Karmanov D.K., Dautkanova D.R. Changing parameters of the microwave field in the grain layer. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2016. N11 (Special Issue 1). 2915-2919 (In English).

8. Pallai-Varsányi E., Neményi M., Kovács A.J., Szijjártó E. Selective Heating of Different Grain Parts of Wheat by Microwave Energy. *Advances in Microwave and Radio Frequency Processing*. 2007. 312-320 (In English).

9. Budnikov D.A. Measurement of the microwave field strength in the grain layer [Izmereniye napryazhennosti SVCh polya v zernovom sloye]. *Vestnik VIESH*. 2015. N4(21). 40-44 (In Russian).

10. Budnikov D.A. Intermediate results of a numerical experiment on microwave heating of variable-density wheat [Promezhutochnye rezul'taty chislenogo eksperimenta po SVCh nagrevu pshenitsy raznoy plotnosti]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2017. N2(23). 22-28 (In Russian).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 07.02.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 07.02.2019

Статья принята к публикации 11.04.2019
The paper was accepted
for publication on 11.04.2019

User-Centred Design and Multi-Actor Approach in Agricultural Innovations – Case: Combi Drill Design

Hannu Haapala,
hannu.haapala@agrinnotech.com

Agrinnotech, Seinäjoki, Finland

Abstract. The author has shown that modern technologies do not always meet the expectations of farmers, and this may adversely affect the pace of innovation. It has been confirmed that the developers of agricultural equipment do not clearly understand the context of the use of products and identified the need to use a multi-factor approach: therefore, partners possessing specific knowledge in different areas should join efforts in project activities at all stages of innovation. (*Research purpose*) To prove that a user-centered design and a multi-factor approach in the development of agricultural machinery increase their efficiency and accelerate the introduction of innovations. (*Materials and methods*) It is shown that Finnish research and development projects of agricultural machinery design involve numerous participants and end users. For example, the seven-metre-wide combi drill 'Junkkari W700' was designed by the Finnish manufacturer Junkkari Oy in close cooperation with end-users and researchers. As a result of the innovation process several benefits have been realized. The drill is easy to operate and service. The users appreciate the straight-forward construction and moderate cost of the drill as compared to competing pneumatic drills. The need for hydraulics is minimized and the row spacing and coulter design has been optimized so that economical tractors with moderate drawbar power can be used. The ISOBUS-based control electronics was designed to be fitted either in the existing tractor or, if ISOBUS is missing, with an optional cable-set and terminal. That enables the users to easily integrate the drill in existing machine chains, having either modern or older tractors, without extra tractor investments. Much attention was put on quality, e.g. individual feeders for every coulter give accurate dosage of seed and fertilizer. The prototyping together with end-users and researchers enabled Junkkari to speed up the innovation process. (*Results and discussion*) Several benefits proved to have been realized. First of all, the drill is easy to operate and service. The users appreciate the straight-forward construction and moderate cost of the drill as compared to competing pneumatic drills. The need for hydraulics is minimized and the row spacing and coulter design has been optimized so that economical tractors with moderate drawbar power can be used. The ISOBUS-based control electronics as well as an optional cable-set and terminal were designed to be fitted either in the existing tractor. That enables the users to easily integrate the drill in existing machine types, having either modern or older tractors, without extra tractor investments. The design quality was approved, e.g. individual feeders for every coulter give accurate metering of seeds and fertilizers. (*Conclusions*) The author proves that user-centered design and multi-factor approach methodologies have benefits both for the users and manufacturers. Swift innovation process saves resources and minimizes the need for excess iterations in the innovation process.

Keywords: agriculture, farm machinery designing, innovation introduction, user-centred design, multi-factor approach, combined drill.

■ **For citation:** Haapala H. User-Centred Design and Multi-Actor Approach in agricultural innovations – case: combi drill design. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N2. 15-19. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-15-19 (In English).

Применение ориентированной на пользователя конструкции и многофакторного подхода при внедрении инноваций на примере проектирования комбинированной сеялки

Ханну Хаапала,
hannu.haapala@agrinnotech.com

Agrinnotech, Сейняйоки, Финляндия

Реферат. Показали, что современные технологии не всегда соответствуют ожиданиям фермеров, а это отрицательно сказывается на темпах внедрения инноваций. Подтвердили, что разработчики сельхозтехники недостаточно

четко понимают контекст использования продуктов. Выявили необходимость использования многофакторного подхода: партнерам, обладающим специальными знаниями в разных областях, следует объединять усилия в проектной деятельности на всех этапах внедрения инноваций. *(Цель исследования)* Доказать, что ориентированная на пользователя конструкция и многофакторный подход при разработке сельскохозяйственных машин повышают их эффективность и ускоряют внедрение инноваций. *(Материалы и методы)* Показали, что в финских исследованиях и разработках конструкции сельскохозяйственных машин в процесс были включены многочисленные участники и конечные пользователи. Например, комбинированную сеялку Junkkari W700 с шириной захвата 7 метров финский производитель Junkkari разработал в тесном сотрудничестве инженеров и фермеров. *(Результаты и обсуждение)* Подтвердили, что такой подход помогает реализовать несколько преимуществ, прежде всего простоту и удобство в эксплуатации и обслуживании сеялки, а также умеренную стоимость по сравнению с пневматическими аналогами. Потребность в гидравлике сведена к минимуму, а междурядное расстояние и конструкция сошников оптимизированы, что позволяет использовать экономичные тракторы с умеренной тягой. При агрегатировании с тракторами предусмотрены как система ISOBUS, так и дополнительный комплект кабелей и выводов. Установили, что фермеры могут легко интегрировать сеялку в существующие типы машин, используя современные или старые тракторы, без дополнительных затрат на новые тракторы. Подтвердили качество конструкции, например, индивидуальные дозаторы для каждого сошника обеспечивают точную дозировку семян и удобрений. *(Выводы)* Доказали, что ориентированная на пользователя конструкция и многофакторный подход имеют преимущества как для фермеров, так и для машиностроителей. Определили, что сокращение количества этапов внедрения инноваций ускорит инновационный процесс и сэкономит ресурсы.

Ключевые слова: сельское хозяйство, разработка сельскохозяйственных машин, внедрение инноваций, ориентированная на пользователя конструкция, многофакторный подход, комбинированная сеялка.

■ **Для цитирования:** Хаапала Х. Применение ориентированной на пользователя конструкции и многофакторного подхода при внедрении инноваций на примере проектирования комбинированной сеялки // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №2. С. 15-19. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-15-19.

Distinguished pioneer of innovation research, Dr. Joseph Schumpeter, made a widely utilized definition of innovation already in the 1930's. According to Schumpeter, true innovations need to give distinct benefits for their users and, simultaneously, they need to be widely adopted [1, 2].

Current innovation research models innovations as repetitive circles where the solutions develop iteratively. There are driving forces and obstacles for innovation. The changing innovation environment has various effects on the innovation process (Fig. 1) [3].

The Spiral of Innovation illustrates the phases of innovation from the initial idea to embedding in prac-

tise (Fig. 2) [4]. Innovation in agriculture often stops at the adoption phase. Dissemination and embedding so that true innovation is not realized.

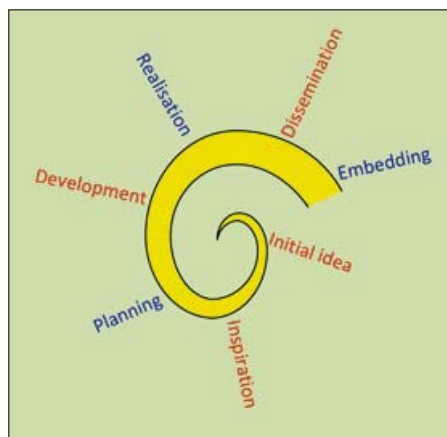


Fig. 2. The Spiral of Innovation

The reasons for poor adoption are traditionally regarded as economical. Higher cost and uncertain benefits are considered to be the main reasons why new solutions are not purchased. However, according to recent research, there are other important obstacles for adoption. Usability issues in products or services cause the users to get bad experiences using new technologies [5]. Bad experiences are communicated effectively in the society. This causes mistrust on new solutions as a whole [6].

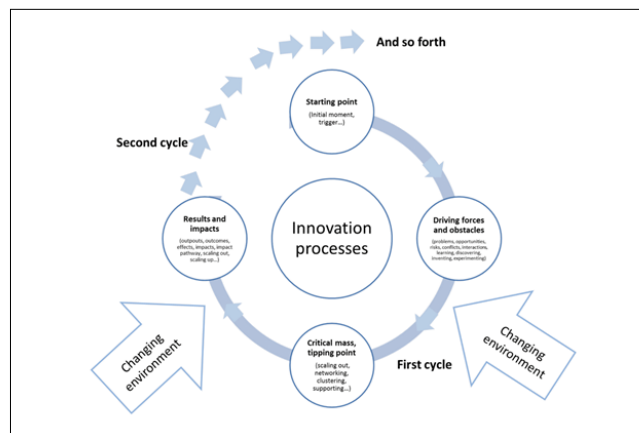


Fig. 1. The dynamic process of innovation development

Consequently, in agriculture, the adoption of new technologies is considered slower than wanted [6]. This is best seen in radical innovations such as Precision Agriculture [6-8]. Incremental modifications of existing technologies are easier to accept. On the other hand, innovations on component level are easier to adopt than those in system level (Fig. 3) [3].

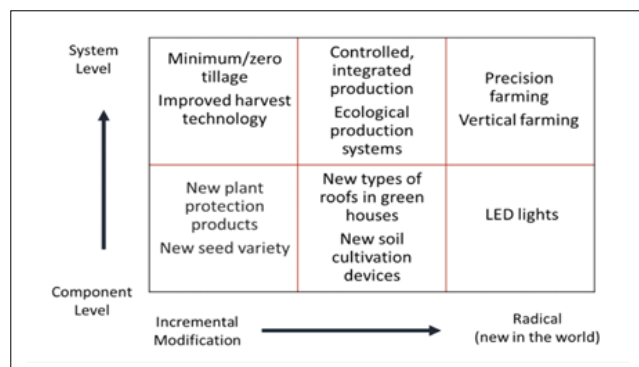


Fig 3. Agricultural incremental and radical innovations (modified Henderson-Clark Model)

If not widely adopted the innovations do not give their full potential. If the process is totally aborted, all the investments in R&D are done in vain, and the projected benefits of the new solutions are not realized [6, 8-10]. To avoid these losses, it is important that the developed products are accepted by their users. Users are in an important role.

According to recent research, an important buying criterion of new solutions in agriculture is usability [6]. Jacob Nielsen states that usable products have a good combination of ease-of-use, learnability, and efficiency [11]. They also operate with few errors. Finally, they are subjectively pleasing.

The technologies need first to be purchased, and then used in a proper manner so that their benefits are realized, so that the users return to buy again (Fig. 4) [6].

User-Centred Design (UCD) is a methodology for designing usable technologies and services. It is widely utilized to ensure better end-user acceptance. Inclusion of end-users in innovation makes the products more suitable for the users' variable situations. The UCD also builds the users' trust on the solutions. Eventually, UCD reduces need for iteration in the process, thus speeding up the innovation [6, 12]

Multi-Actor Approach (MAA) brings different kinds of people together to develop solutions. Best results are achieved when the participants have long enough cognitive distances. MAA speeds up the innovation processes as the products have been assessed from several angles [3]. The probability for reaching a winning product arise.

THE RESEARCH PURPOSE is to prove that the User-Oriented Design and the Multi-Factor Approach applied in the designing of agricultural machinery increase

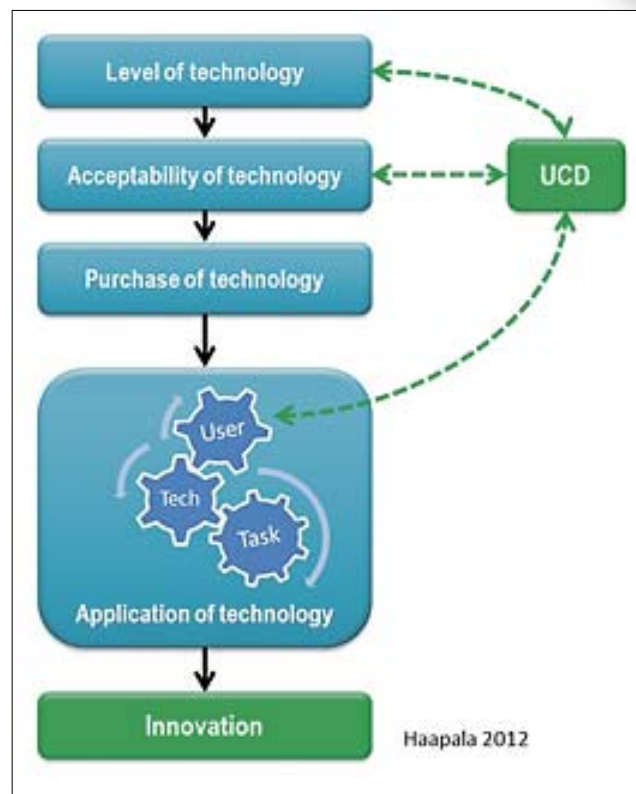


Fig. 4. User-Centred Design as a tool to enhance innovation

their efficiency and accelerate the introduction of innovations.

MATERIALS AND METHODS. Two research projects on agricultural innovations, 'Speeding up innovation in agriculture' and 'AgriSpin' were initiated. A case-study of designing a new type of combi drill was done.

'Speeding up innovation in agriculture' (2011-2012) was funded by the of the Organisation for Economic Co-operation and Development. The research was done as a web-based questionnaire (N=41) and personal interviews of selected experts (N=10). Webropol™ software was used for the questionnaire. The respondents' competence profile was variable. They were strong in engineering, research and practical use of technologies at the farm level. Weaknesses were found in skills in marketing and sales. Neither they were familiar with teaching of design.

The questionnaire had three parts: assessing the current PF technology, the application rate of PF technology, and the acceptability as a challenge in PF. Furthermore, the responders were asked to tell what they thought about the applicability of UCD as a methodology to enhance innovation in agricultural engineering. The experts also gave their opinions and visions of the most important research and development topics of UCD in agricultural engineering. Finally, they rated the importance and urgency of UCD and PF related actions in research policy.

'AgriSpin' (2015-2017), was funded by EU research and innovation program Horizon 2020. The objective

of AgriSpin was to systematically explore innovation intermediaries' practices and support services in agriculture and rural development across Europe. The overall goal was to help create a stimulating environment for innovations.

The Cross Visit Methodology including thorough analysis of 50 innovation cases in Europe was applied and improved during the project. The Spiral of Innovation was used to illustrate the cases and to communicate them to wider audience. In Final Symposiums relevant stakeholders were informed about the findings, and challenged for developing the local innovation environment of agriculture.

The inclusion of end-users and multiple actors has been used in Finnish R&D of agricultural machines. As an example, the 7 m wide combi drill 'Junkkari W700' was designed by the Finnish manufacturer Junkkari Oy in close cooperation with end-users and

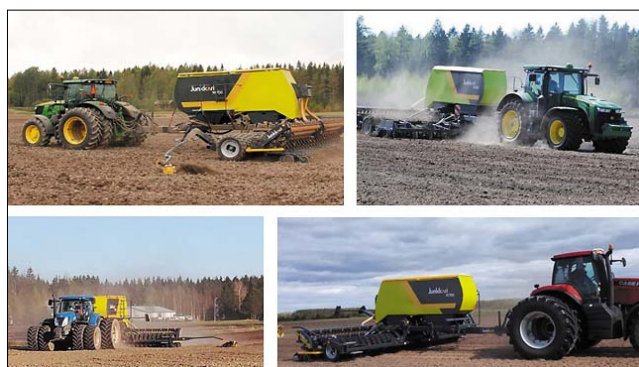


Fig. 5. User-Centred testing of the 7 m wide Junkkari W700™ combine drill for seed and fertilizer

researchers. The prototypes were assessed by multiple users with different drilling circumstances (Fig. 5). In 2018 there were 5 machines tested in Finland and one in Estonia [13]. An expert group was established that assisted Junkkari along the design process.

RESULTS AND DISCUSSION. Speeding up innovation in agriculture' concluded that designers tend to have inadequate understanding of the use-context of the products [6, 8]. It was recommended e.g. that education of engineers, designers, marketers and end-users needs to include UCD methodologies. This is in line with the findings of Knierim et al. and Nielsen who see user-interaction as a basic tool for designing better usable products [3, 11].

The 'AgriSpin' concluded that the social part of ag-

ricultural innovations should be better understood to be able to support them efficiently [3]. A recommendation was made that MAA should be used during the innovation process to tackle the challenges better. In MAA partners with complementary types of knowledge – scientific, practical and other – join forces in project activities from beginning to end. The analysed 50 cases revealed that the use of MAA produced innovative results [14]. The theories of the importance of the social process in innovations got confirmed [3].

The case-study, the design of 'Junkkari W700' combi drill, revealed benefits of increased user-interaction. The users tell that the drill is easy to operate and service. The users appreciate the straight-forward construction and moderate cost of the drill as compared to competing pneumatic drills. This was realized through the introduction of a novel type of mechanical material transport. The need for hydraulics was minimized and the row spacing and coulter design was optimized so that economical tractors with moderate drawpower can be used. The ISOBUS-based control electronics was designed to be fitted either in the existing tractor or, if ISOBUS is missing, with an optional cable-set and terminal. That enables the users to easily integrate the drill in existing machine chains, having either modern or older tractors, without extra tractor investments. Much attention was put on the quality of the drilling work. Individual feeders were installed for every coulter as to give accurate dosage of seed and fertilizer. The prototyping together with end-users and researchers gave Junkkari the possibility to speed up the innovation process. The results supported the theories of Nielsen on the importance of usability design [11].

CONCLUSIONS. As a conclusion, the UCD and MAA methodologies have benefits both for the users and manufacturers. The resulting swift innovation process saves resources and minimizes the need for excess iterations in the innovation process.

Acknowledgements

The 'Speeding up innovation in agriculture' project was funded by OECD Joint Research Programme, and the 'AgriSpin' by EU Research and Innovation programme Horizon 2020.

REFERENCES

1. McCraw T. 2010. Prophet of Innovation: Joseph Schumpeter and Creative Destruction. Cambridge: Harvard University Press. 719 (In English).
2. OECD. Oslo Manual. The measurement of scientific and technological activities. Proposed guidelines for collecting and interpreting technological innovation data. European Commission. 3rd ed. 2005. 163. 8 (In English).
3. Knierim A., Koutsouris A., Mathe S., Ndah H.T., Temple L., Tromphe B., Wielinga E. Support to innovation processes: a theoretical point of departure: WP1 deliverable



1.1: report of the AgriSpin project. University of Hohenheim, Germany. 2015. <http://agrispin.eu/wp-content/uploads/2016/01/Theoretical-Framework-of-AgriSpin.pdf>. Last accessed 08.04.2019 (In English).

4. Wielinga E. AgriSpin cross visit manual: Space for innovations in Agriculture. 10th ed. 2016. http://agrispin.eu/wp-content/uploads/2016/11/Cross-Visits_Improved-Methodology-1.pdf. Last accessed 08.04.2019 (In English).

5. Haapala H., Nurkka P. Usability as a Challenge in Precision Agriculture – case study: an ISOBUS VRT. *Agric. Eng. International: the CIGR Ejournal*. 2006. 9 (In English).

6. Haapala H. The potential of User-Centred Design (UCD) to make radical agricultural innovations. In: Proc. International Conference of Agricultural Engineering – CIGR-AgEng 2012: Agriculture and Engineering for a Healthier Life. Valencia, Spain, 8-12 July 2012. C-0094 (In English).

7. Diekmann F., Batte M. Ohio Farming Practices Survey: Adoption and Use of Precision Farming Technology in Ohio. Experimentation report AEDE-RP-0129-10. 2010. 21 (In English).

8. Haapala H. How to speed up innovation in agriculture? Book of Abstracts. The 3rd Agromek-EurAgEng joint seminar. Advances and Innovations in Agricultural Engineering. Nov.

27-28 2018. Herning, Denmark. NJF sektion Technology. 2018. 31 (In English).

9. Haapala H. Speeding up innovation in agricultural IT. *Journal of Agricultural Engineering*. 2013. Vol. XLIV. 137-139 (In English).

10. Winstead A., Norwood S., Griffin T., Runge M., Adrian A., Fulton J., Kelton J. Adoption and Use of Precision Agriculture Technologies by Practitioners. In: Proc. 10th International Conference on Precision Agriculture, 18-21 July 2010. Denver, Colorado (In English).

11. Nielsen J. Usability Engineering. 1993. Academic Press Inc. 362 (In English).

12. Li W., Hess T., Valacich J. Why do we trust new technology? A study of initial trust formation with organizational information systems. *The Journal of Strategic Information Systems*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsis.2008.01.001>. 2008. Elsevier. Vol. 17. N1. 39-71 (In English).

13. Anon. Jukkari W700. Genius Giant. ppt-presentation by Jukkari Oy. 2019. 29 (In English).

14. Wielinga E., Robijn S. 2018. Stories from All Corners, To Continue With. SEGES, Aarhus, Denmark. <https://agrispin.eu/wp-content/uploads/2018/02/D3.2-End-user-book-002.pdf>. Last accessed 08.04.2019. 228 (In English).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 28.03.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 28.03.2019

Статья принята к публикации 12.04.2019
The paper was accepted
for publication on 12.04.2019

Methane Production From Industrial Hemp

Aleksandrs M. Adamovics,
Dr.Sc.(Agr.), adamovics.aleksandrs@llu.lv;
Semjons A. Ivanovs,
Dr.Sc.(Eng.);

Vilis S. Dubrovskis,
Dr.Sc.(Eng.)

Latvia University of Life Sciences and Technologies, Jelgava, Latvia

Abstract. Due to the increasing shortage of fossil fuels, the use of alternative energy sources is becoming even more popular. In Latvia, maize is predominantly used for the production of biogas, and other crops are being studied for this purpose. (*Research purpose*) To study the productivity of industrial hemp varieties (*Cannabis sativa* L.) and the possibility of obtaining biogas from hemp. (*Materials and methods*) Field experiments on hemp productivity were carried out on sod calcareous, heavy dusty sand clay soils in 2012-2014. Ten industrial varieties of hemp – 'Bialobrzeskie', 'Futura 75', 'Fedora 17', 'Santhica 27', 'Beniko', 'Ferimon', 'Epsilon 68', 'Tygra', 'Wojko', and 'Uso 31' – were sown with a seeding rate of 50 kilogram per hectare at the background of fertilizers: nitrogen – 120, phosphoric oxide – 90, potassium oxide – 150 kilogram per hectare. Hemp was sown on 10-square meter plots in mid-May, in triplicate. Hemp was harvested at the beginning of seed ripening phase. The whole crop of green mass was calculated on a completely dry matter. The fermentation process for the production of biogas, the average yield of methane, and other parameters were studied in the Laboratory of Bioenergetics of the Latvia University of Life Sciences and Technologies, using small-sized bioreactors. (*Results and discussion*) The dry matter yield of hemp obtained in the agro-climatic conditions of Latvia averaged 13.32-17.78 tons per hectare. For an average of three years (2012-2014), higher yields of dry matter were obtained from the varieties of 'Futura 75' (17.76 tons per hectare) and 'Tygra' (16.31 tons per hectare). The average amount of methane obtained from the 'Uso 31' leaves was 0.365 litre from one gramme of dry organic matter, which is a very good result as compared to other energy crops, for example, corn silage (0.319-0.330 litre from one gramme of dry organic matter in Latvia). (*Conclusions*) The research has demonstrated that hemp can be successfully used to produce biogas, and hemp leaves are the most suitable starting material.

Keywords: industrial hemp (*Cannabis sativa* L.), productivity, methane, biogas, bioreactor.

■ For citation: Adamovics A.M., Ivanovs S.A., Dubrovskis V.S. Methane production from industrial hemp. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N2. 20-26. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-20-26 (In English).

Производство метана из промышленной конопли

Александр Михайлович Адамовичс,
доктор сельскохозяйственных наук,
adamovics.aleksandrs@llu.lv;

Семен Агафонович Ивановс,
доктор инженерных наук;
Вилис Станиславович Дубровскис,
доктор инженерных наук

Латвийский университет естественных наук и технологий, г. Елгава, Латвия

Реферат. Из-за растущей нехватки ископаемого топлива использование альтернативных источников энергии становится все более популярным. В Латвии кукуруза является доминирующей культурой, используемой для производства биогаза, однако ведутся также исследования по использованию других энергокультур. (*Цель исследования*) Изучить продуктивность сортов промышленной конопли (*Cannabis sativa* L.) и возможности получения из нее биогаза. (*Материалы и методы*) Полевые опыты по изучению продуктивности конопли проводили в 2012-2014 гг. на плодородных дерново-карбонатных, среднетяжелых почвах. Десять промышленных сортов конопли – Bialobrzeskie, Futura 75, Fedora 17, Santhica 27, Beniko, Ferimon, Epsilon 68, Tygra, Wojko и Uso 31 высевали с нормой посева семян 50 килограммов на гектар на фоне удобрений: азота – 120, оксида фосфора – 90, оксида калия – 150 килограммов на гектар. Коноплю сеяли в середине мая, на учетных делянках площадью 10 квадратных метров, в трехкратной повторности. Урожай убрали в начале фазы созревания семян. Всю зеленую массу пересчитали на



абсолютно сухое вещество. Процесс брожения для производства биогаза, средний выход метана и другие параметры изучали в лаборатории биоэнергетики Латвийского университета естественных наук и технологий, используя малогабаритные биореакторы. (*Результаты и обсуждение*) Урожайность сухого вещества конопли, полученного в агроклиматических условиях Латвии, в среднем составила 13,32-17,78 тонны с гектара. В среднем за три года (2012-2014 гг.) более высокие урожаи сухого вещества получили от сортов Futura 75 – 17,76 тонны с гектара и Tygra – 16,31 тонны с гектара. Среднее количество метана, полученного из листьев Uso 31 составило 0,365 литра на грамм сухого органического вещества. Хороший результат по сравнению с другими энергетическими культурами, например кукурузным силосом, показатель которого в Латвии равен 0,319-0,330 литра на грамм сухого органического вещества. (*Выводы*) Результаты исследований показали, что коноплю, особенно ее листья, с успехом можно использовать для производства биогаза.

Ключевые слова: промышленная конопля (*Cannabis sativa* L.), продуктивность, метан, биогаз, биореактор.

■ Для цитирования: Адамовичс А.М., Ивановс С.А., Дубровскис В.С. Производство метана из промышленной конопли // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. N2. С. 20-26. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-20-26.

Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) is one of the oldest home-grown and most versatile plants, and it has been cultivated over a long time period. In 19th century, its cultivation thereof in Europe declined, while recently, it has attracted interest again [1]. Nowadays, industrial hemp has become important as a crop used for biomass production. Environmental concern and recent shortage of wood fibre have renewed utilisation of hemp for wide range of industrial products, including textiles, paper, and composite wood products [2].

Analyses of the latest trends in hemp cultivation and use as well as experimental results allow concluding that hemp cultivation and processing in Latvia are very perspective, since this plant is fast-growing and suitable for Latvia's agro-climatic conditions.

Recently in Latvia, the number of industrial hemp growers and the area of cultivated land both have increased, and, in line with the data provided by the Association of Industrial Hemp of Latvia, hemp plantations in 2018 occupied approximately 1100 ha, showing growing interest in this agricultural sphere.

The amount of biogas obtained from various raw materials differs [3, 4]. Several researchers, when studying similar raw materials, have come to different conclusions, and the results depend upon substrate, conditions under which anaerobe process takes place, microorganisms content, and other factors [5, 6]. One of the key factors influencing the production of biogas is the content of organic matter, especially the content of three main organics matter [7, 8] groups: carbohydrates, proteins, and lipids.

Biogas may be produced from various waste, e.g., pig manure – with yielding of 0.34-0.68 m³/kg dry organic matter (DOM), cattle manure (0.2-0.4 m³/kg DOM), poultry manure (0.37-0.64 m³/kg DOM), dairy produce waste (0.62 m³/kg DOM), and sewage sludge (0.2-0.6 m³/kg DOM).

Various kinds of straw can also be one of the raw materials used to produce biogas. Usually, they are

used as bedding in livestock and poultry housings, and together with manure it is a cheap material.

Also freshly mown grass may be used for biogas production. Grasses vary, and the biogas yielded from them will differ as well. Theoretically, legumes should produce more biogas compared to grasses. Moreover, soil in which and climatic conditions under which grass has grown are of great significance. The average content of grass dry matter comprises 12-25%, the content of DOM – 85-93%.

Unfortunately, literature sources only sometimes indicate the particular grass used, and thus, the data taken mainly from German researches, not always are suitable for use under Latvia's conditions. As it can be seen in tables, data are contradictory, and in several cases, it seems that authors have mistaken biogas for methane. In Latvia, the potential of biogas production from various grasses has been studied only in few researches, and biogas yield from hemp has been investigated only once. Moreover, information acquired in foreign researches is very poor [9-15]. Currently, Lund University in Sweden is conducting a hemp research; within the framework of it, rather good results have been acquired, and it has been concluded that industrial hemp grown under climatic conditions of south Sweden (Skone) is one of the energy plants that is the most suitable for biogas production

THE RESEARCH PURPOSE is to investigate the productivity of industrial hemp varieties (*Cannabis sativa* L.) and the possibility of obtaining biogas from it.

MATERIALS AND METHODS. Field trials were carried out in the Study and Research Farm "Peterlauki" (56°53' N, 23°71' E) of the Latvia University of Life Sciences and Technologies in 2012-2014. Ten industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) cultivars – 'Bialobrzieskie', 'Futura 75', 'Fedora 17', 'Santhica 27', 'Beniko', 'Ferimon', 'Epsilon 68', 'Tygra', 'Wojko' and 'Uso 31' – were sown in the sod calcareous soil Luvisols (according to FAO classification); granulometric composition: heavy dusty

sand clay. Soil agrochemical parameters: pH KCl 6.7 (LVS ISO 10390: 2006); organic matter content: 21 g/kg (by Tyurin method, LV ST ZM 80-91), the phosphorus (P) and potassium (K) level – 52 mg/kg and 128 mg/kg, respectively (according to Egner-Rhym method, LV ST ZM 82-97). Total seeding rate comprised 50 kg/ha. The plots were fertilised as follows: N – 120, P₂O₅ – 90, K₂O – 150 kg/ha. Hemp was sown in 10 m² plots by using the plot sowing machine “Wintersteiger”, triplicate, in the middle of May. Hemp was harvested using the small mower “MF-70” when first matured seed appeared (Fig. 1). Biometrical indices of hemp seedlings, the height and stem diameter in the middle of harvesting time, the amount of green and dry above-ground mass, and fibre content were evaluated.



Fig. 1. Field trials of hemp at the research and study farm ‘Peterlauki’ of the Latvia University of life sciences and technologies

The research was conducted with industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) that was taken from trial plots. The samples were tested with analyses necessary for successful anaerobic fermentation (AF) process – complete dry matter, ash, and organic dry matter were

measured. Basing on the results of the analyses, the necessary quantity of hemp was calculated (100 g), which, afterwards, was filled in the bioreactors B2, B3 and B4 together with yeast (2000 g) and water (1500 g). The remaining biogas potential of yeast was verified by fermenting it in the bioreactor B1. Substrate formation proportions were equal in all bioreactors: 2000 g of yeast, 100 g of hemp to be fermented, and 1500 g of warm water. Hemp was chopped – the length of pieces in coarse chopping was 1-2 cm, while fine chopping that was made with electric chopper produced 1-5 mm pieces. Each substance was carefully weighted before filling it in bioreactors. Fermentation took place within single filling regime till biogas was not forming anymore. Each day, all parameters necessary to control the process – gas amount and content, pH, pressure, temperature in room and bioreactors – were registered in a research journal. Also, digestate was weighted and the content thereof was analysed. Substrate in bioreactors was mixed with a specific devise operated by a mobile perforator. (Note: the quantity of yeast depended on the condition that such a quantity can be taken out of a continuously working bioreactor, thus ensuring equal conditions in all bioreactors. The condition that there was sufficiently much yeast, notably speeded up the start of a stable AF process.

Biogas researches were conducted with industrial hemp cultivars ‘Futura 75’ and ‘Uso 31’.

The amount of biogas obtained was researched using a laboratory device consisting of four 5 l bioreactors (Fig. 2). Each bioreactor was equipped with the temperature maintenance and gas collection devices and an automatic registration apparatus. pH and pressure were controlled visually, afterwards registering parameters thereof in computer. Observations were made at 38±1°C temperature under a single filling regime.



Fig. 2. A laboratory device consisting of four 5 l bioreactors

With the aim to speed up the start of the process, the yeast for 5 l bioreactors was taken from a working bioreactor. Microbiological yeast was fermented with cattle manure that was added in each bioreactor (15% of total substrate). For substrate and dry matter of each substance, ash and organic dry matter were cleared

out before filling them in bioreactors. Measurement precision was ± 0.02 for pH, ± 0.00251 for gas, and $\pm 0.1^\circ\text{C}$ for temperature. Biogas content was measured periodically by finding out the content of CH_4 , CO_2 , O_2 , and H_2S .

Complete dry matter was measured with the dry matter weights “Shimazu” at the temperature of 120°C , the content of organic dry matter was determined by drying the samples under a particular programme at 550°C in the oven “Nabertherm”. Gas content was measured with gas analyser “GA 2000”, thus finding out the content of methane, oxygen, carbon dioxide, and hydrogen sulphide in biogas, as well as the pressure and normal gas volume. Weighting was made with the weights “Kern FKB 16KO2”; pH was measured with the pH meter “PP-50” with accessories (stationery).

A mean hemp sample was taken, and its content was studied basing on standardised methodologies in compliance with ISO 6496:1999 in the Bioenergetics Laboratory of Latvia University of Life Sciences and Technologies. Mean sample and yeast of each raw material group were investigated to determine full dry matter, organic dry matter, and the content of main

Hemp cultivars	2012	2013	2014	Average
Bialobrzeskie	11.95	12.91	15.56	13.47
Futura 75	21.33	17.14	14.81	17.76
Fedora 17	18.23	13.32	12.78	14.78
Santhica 27	17.39	11.57	13.47	14.14
Beniko	19.27	13.30	11.96	14.84
Ferimon	18.59	13.09	12.93	14.87
Epsilon 68	12.89	18.47	14.47	15.28
Tygra	20.87	14.66	13.40	16.31
Wojko	19.91	14.83	11.79	15.51
Uso 31	17.38	11.40	11.98	13.59
Average	17.78	14.07	13.32	15.06
LSD 0.05 variety	3.15			
LSD 0.05 year	1.92			
LSD 0.05 interaction between variety and year	4.03			

Raw/digester	pH	TS*, %	TS*, g	Ash, %	DOM*, %	DOM*, g	Weight, g	Total weight, g
Inoculum, B1-1	7.29	3.40	68.0	23.1	76.89	52.29	3500	52.29
Coarse Uso 31, B1-2	7.19	63.97	63.97	7.15	92.85	59.4	3600	111.69
Fine Uso 31, B1-3	7.22	55.13	55.13	7.51	92.49	50.99	3600	103.28
Uso 31 leaves, B1-4	7.25	62.96	62.9	16.1	83.84	52.79	3600	105.08

*Abbreviations: TS – total solids; DOM – dry organic matter

elements; moreover, each sample was weighted carefully and the yeast mixed with the rest of the mass. The same yeast was used for all four samples – digestate from the continuously working bioreactor. The bioreactors of 0.7l were filled with 20 g of hemp and 0.5 l of yeast (weight was registered with a 0.2 g precision). All bioreactors (altered standard containers) were connected with gas accumulation bags and taps, placed in the oven under the temperature of $38 \pm 0.5^\circ\text{C}$. The amount and content of gas produced were measured every day; bioreactors were shaken with the same frequency thus mixing the substrate and reducing the floating layer.

Results and discussion. The yield of hemp dry matter (DM) obtained in the field trials under agro-climatic conditions of Latvia was 13.32–17.78 t/ha (15.06 t/ha on average). Cultivation year and selected variety notably affected hemp biomass yield (Table 1). In 2012, depending on the variety, a notably higher yield of absolute DM biomass (on average 17.78 t/ha) was obtained from the cultivars ‘Futura 75’ (21.33 t/ha), ‘Tygra’ (20.87 t/ha), ‘Beniko’ (19.27 t/ha), and ‘Wojko’ (19.91 t/ha). On average in three years (2012–2014), relatively higher

DM yields were obtained from varieties ‘Futura 75’ (17.76 t/ha) and ‘Tygra’ (16.31 t/ha).

Statistical assessment showed that meteorological conditions present during the growing season influenced the total volume of dry biomass yield.

The measurements obtained were summarised in tables and served as a base to calculate the potential for producing biogas and methane in each bioreactor. Calculations were made bearing in mind also the volume of gas produced in the control bioreactor (the one from which yeast was taken) (Table 2).

Hemp cultivar ‘Uso 31’ was taken from the trial field on 24 August 2013, on a very dry and sunny day, and on 4 September 2013, it was filled in a bioreactor. This condition as well as the condition that this hemp was stored in suitable premises may explain the comparatively high content of dry matter and dry organic matter. Anaerobe fermentation lasted for 53 days. The results of digestate analyses are shown in Table 3.

In all bioreactors, gas was appearing evenly, already within the first days, except the control bioreactor, which contained only yeast and water. In this reactor,

Table 3
RESULTS OF DIGESTATE ANALYSES

Raw / digester	pH	TS*, %	TS*, g	Ash, %	DOM*, %	DOM*, g	Weight, g
Inoculum, B1-1	7.32	2.18	66.17	25.62	74.38	49.22	3028
Coarse Uso 31, B1-2	7.41	2.62	79.38	23.01	76.99	61.12	3030
Fine Uso 31, B1-3	7.36	2.41	75.19	21.58	78.42	58.96	3120
Uso 31 leaves, B1-4	7.48	2.56	81.10	28.14	71.86	58.28	3168

*Abbreviations: TS – total solids; DOM – dry organic matter

only a small amount of gas was produced, which means that yeast contained a very small quantity of not decomposed organic matter that is consumed by bacteria. Biogas and methane yields produced in all bioreactors are shown in *Table 4*.

The highest amount of biogas and methane was produced in the bioreactor B1-4, which fermented chopped leaves. This may be explained by the fact that

subtracted from the total volume acquired in each bioreactor). Also, the average indicators of each group were calculated. The results of raw material analyses were summarised in *Table 5*.

As it can be seen in *Table 5*, hemp has high contents of dry matter (41.62-62.96%) and organic dry matter. This may be explained by the fact that hemp was harvested in dry weather and kept in dry premises before chopping. The results of digestate analyses are presented in *Table 6*.

The biogas and methane volumes yielded from the coarse-chopped 'Futura 75' are presented in *Table 7*.

The biogas and methane volumes yielded from the fine-chopped hemp cultivar 'Futura 75' are shown in *Table 8*.

The biogas and methane yields obtained from the fine-chopped 'Uso 31' are summarised in *Table 9*.

Table 4
BIOGAS AND METHANE PRODUCED FROM HEMP CULTIVAR 'USO 31'

Raw/digester	Biogas, l	Biogas, l/g DOM	Methane, l/g DOM
Inoculum, B1-1	0.6	0.011	0.003
Coarse Uso 31, B1-2	22.93	0.376	0.195
Fine Uso 31, B1-3	22.58	0.431	0.230
Uso 31 leaves, B1-4	30.32	0.563	0.334

Table 5
RESULTS OF RAW MATERIAL ANALYSES

Raw/digester	pH subs.	TS*, %	TS*, g	Ash, %	DOM*, %	DOM*, g	Weight, g	Total DOM*, g
Coarse Futura 75, R2-4	7.31	41.62	8.32	9.1	90.9	7.57	520	16.33
Inoculum, R1, R16	7.29	2.35	11.75	25.44	74.6	8.76	500	8.76
Fine Futura 75, R5-8	7.32	43.39	8.68	4.5	95.5	8.29	520	17.05
Fine Uso 31, R9-12	7.28	55.13	11.03	7.51	92.5	10.20	520	18.96
Uso 31 leaves, R13-15	7.25	62.96	12.59	16.16	83.8	10.56	520	19.32

*Abbreviations: TS – total solids; DOM – dry organic matter

Table 6
AVERAGE RESULTS OF DIGESTATE ANALYSES

Raw/digester	pH substr.	TS*, %	TS*, g	Ash, %	DOM*, %	DOM*, g	Weight, g
Coarse Futura 75, R2-4	7.17	3.58	18.19	23.76	76.24	13.87	508.2 3.1
Inoculum, R1, R16	7.45	2.30	11.47	26.48	73.52	8.44	498.9
Fine Futura 75, R5-8	7.08	3.24	16.56	22.03	77.97	12.91	511.1
Fine USO 31, R9-12	7.06	3.06	15.61	21.37	78.73	12.29	510.0
USO 31 leaves, R13-15	7.29	3.39	17.3	29.26	70.74	12.24	510.2

*Abbreviations: TS – total solids; DOM – dry organic matter

hemp stems contain comparatively more cellulose and lignin, which is difficult to degrade by bacteria.

When calculating the volumes of biogas and methane obtained, also the biogas and methane produced from control yeast were taken into account (they were

The biogas and methane yields obtained from chopped 'Uso 31' leaves are shown in *Table 10*.

The average biogas and methane volumes yielded from various hems are summarised in *Table 11*. The results suggest that the highest amount of methane

Raw/digester	Biogas, l	Biogas, l/g DOM	Methane, l/g DOM
Coarse Futura 75, R2	2.8	0.370	0.177
Coarse Futura 75, R3	2.7	0.357	0.172
Coarse Futura 75, R4	2.9	0.383	0.185
Inoculum, R1	0.1	0.011	0.002

Raw/digester	Biogas, l	Biogas, l/g DOM	Methane, l/g DOM
Fine Futura 75, R5	4.0	0.481	0.245
Fine Futura 75, R6	4.0	0.482	0.246
Fine Futura 75, R7	3.9	0.470	0.240
Fine Futura 75, R8	4.1	0.530	0.270
Inoculum, R1	0.1	0.011	0.002

Raw/digester	Biogas, l	Biogas, l/g DOM	Methane, l/g DOM
Fine Uso 31, R9	4.5	0.441	0.226
Fine Uso 31, R10	4.1	0.402	0.205
Fine Uso 31, R11	4.3	0.422	0.216
Fine Uso 31, R12	4.3	0.421	0.215
Inoculum, R1	0.1	0.011	0.002

was obtained from chopped 'Uso 31' leaves, which may be due to the fact that they contained more juice and less cellulose and lignin compared to stems. Comparison to same-fineness hemp cultivars 'Futura 75' and 'Uso 31' demonstrated that 'Futura 75' produced more methane.

Raw/digester	Biogas, l	Biogas, l/g DOM	Methane, l/g DOM
Leaves Uso 31, R13	6.7	0.634	0.375
Leaves Uso 31, R14	6.3	0.507	0.354
Leaves Uso 31, R15	6.5	0.616	0.365
Inoculum, R1	0.1	0.011	0.002

The average amount of methane obtained from 'Uso 31' leaves (0.365 0.010 l/g DOM) is a very good result as compared to other energy crops, for example, maize silage (0.319-0.330 l/g DOM in Latvia). Studies on 'Futura 75' resulted in 0.234-0.290 l/g DOM of methane. Research on the influence of harvesting time on the methane output allowed concluding that this influence is insignificant – only slightly smaller than that on the hemp harvested in October [14]. A more notable effect was left by pre-processing, and, if samples were chopped into 1-2 mm pieces, a total of 0.290 l/g DOM of methane was obtained.

CONCLUSIONS

1. Under agro-climatic conditions of Latvia, varieties of industrial hemp provide on average 15.0 t/ha of dry matter yield. The highest biomass yield during trial years was obtained from the cultivars 'Futura 75' and 'Tygra': 17.76 t/ha and 16.31 t/ha respectively. According to the data, a conclusion can be drawn that the growing season and the selected industrial hemp variety had a significant ($p < 0.05$) effect on hemp yield.

2. The research suggests that the biomass of hemp grown in Latvia provides high methane extraction; therefore it can be used for biogas production.

3. A larger methane outcome was obtained from finely chopped hemp stalks and leaves.

4. Influence of hemp harvesting time of two weeks on the methane output is insignificant.

Raw/digester	Biogas, l	Biogas, l/g DOM	Methane, %	Methane, l (without inoculum)	Methane, l/g DOM added
Inoculum	0.1	0.011	20.3	0.02	0.002
Coarse Futura 75, R2-4	2.8	0.370	48.21	1.33	0.177±0.007
Fine Futura 75, R5-8	4.0	0.482	51.03	2.036	0.246±0.023
Fine USO 31, R9-12	4.3	0.422	51.18	2.206	0.216±0.011
Uso 31 leaves, R13-15	6.5	0.616	59.25	3.852	0.365±0.01

REFERENCES

1. Kortekaas S. Contribution of extractives to methanogenic toxicity of hemp black liquor. *Journal of Fermentation and Bioengineering*. 1995. 80(4). 383-388 (In English).
2. Feasibility of Industrial Hemp Production in the United

States Pacific Northwest. Oregon State Universit. Online: www.extension.oregonstate.edu/catalog/html/sb/sb681/ (In English).

3. Baader W., Dohne E., Brenndörfer M. Biogas in Theorie

und Praxis. Darmstadt: Kranichstein. 1982. 148 (In German).

4. Angelidaki I., Alves M., Bolzonella D., Borzacconi L., Campos J.L., Guwy A.J., Kalyuzhnyi S., Jenicek P., Lier J.B. Defining the biomethane potential (bmp) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*. 2009. 59(5). 927-934 (In English).

5. Lin J.G., Ma Y.S., Chao A.C., Huang C.L. BMP test on chemically pretreated sludge. *Bioresour. Technol.* 1999. 68(2). 187-192 (In English).

6. Dubrovskis V., Plūme I., Koteļņečs V., Zabarovskis E. Biogas production and biogas potential from agricultural biomass and organic residues in Latvia. *Engineering for rural development*. 2011. Vol. 10. 566-571 (In English).

7. Fernandez B., Porrier P., Chamy R. Effect of inoculum substrate ratio on the start-up of solid waste anaerobic digesters. *Water Science & Technology*. 2001. 44(4). 103-108 (In English).

8. Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung. Online: http://www.fnr-server.de/ftp/pdf/literatur/pdf_208-leitfaden_biogas_2010_neu.pdf (In German).

9. Joy J.E., Stanley J., Watson S.J., John A., Benson J.R. Marijuana and Medicine: Assessing the Science Base. Washington D.C: National Academy of Sciences Press. 1999. 256 (In English).

10. Kamat J., Roy D.N.M, Goel M.K.M Effect on harvesting age on the chemical properties of hemp plants. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 2002. N22(4). 285-293 (In English).

11. Struik P.C., Amaducci S., Bullard M.J., Stutterheim N.C., Venturi G., Cromack H.T.H. Agronomy of fibre hemp (*Cannabis sativa* L.) in Europe. *An International Journal Industrial Crops and Products*. 2000. 11. 107-118 (In English).

12. Thomas P., Svensson S., Andersson A., Mattsson J.E. Energy balances for biogas and solid biofuel production from industrial hemp. *Biomass and Bioenergy*. 2011. 35(7). 3040-3049 (In English).

13. Projektes „Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung“, Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung. 2010. 267 (In German).

14. Adamovičs A., Dubrovskis V., Plūme I., Jansons Ā., Lazdiņa D., Lazdiņš A., Biomasas izmantošanas ilgtspējības kritēriju pielietošana un pasākumu izstrāde [Criteria for biomass use sustainability and development of measures]. Rīga: Vides projekti. 2009. 125-159 (In Latvian).

15. Pakarinen A., Maijala P., Stoddard F., Santanen A., Kymalainen M., Viikari L. Evaluation of annual bioenergy crops in the Boreal zone for biogas and ethanol production. *Biomass and Bioenergy*. 2011. 35(7). 3071-3078 (In English).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 03.04.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 03.04.2019

Статья принята к публикации 12.04.2019
The paper was accepted
for publication on 12.04.2019

Use of Biochar-peat Mixture to Reduce Odour from Animal Farms

Maarit Hellstedt,
maarit.hellstedt@luke.fi

Natural Resources Institute (Luke), Finland

Abstract. Odour from agriculture causes local nuisance to the neighborhood. Litter and cover materials can be used in animal housing and in storage of manure to reduce the odour problem. The use of biochar as a covering for animal manures is a new innovation and enhances the possibility to minimize the emissions from animal farms. (*Research purpose*) To study the possibility of using a mixture of biochar and peat as a manure covering, in order to reduce the intensity of odor on livestock farms. (*Materials and methods*) The potential of a mixture of biochar and peat for the odour control was tested in a laboratory study. A 10 cm layer of fresh mink manure was placed on the bottom of a 5 liter test bucket and the manure was covered with biochar-peat mixture (mixed in 50/50 ratio by volume) using five different covering thicknesses. Uncovered manure was used as a reference. The odour emission was measured with an olfactometric method that is based on odour sensation of a person. Also the character of the odour was described. (*Results and discussion*) The results show that a biochar-peat covering of at least 3 cm is able to considerably reduce the odour from the manure. The character of the odour was at first peat-like for all covered buckets but with thin coverings it was changed to more manure-like after 2 days. The odour from buckets with thicker covers remained peat-like during the whole testing period. (*Conclusion*) It is recommended to apply a biochar-peat covering to neutralize ammonia and the unpleasant manure odour on livestock farms. The author has shown that the frequency of use and the thickness of a covering layer depend on the ambient temperature; therefore, it is not necessary to cover manure in winter.

Keywords: emission, neutralization of unpleasant odour, annoyance, biochar, peat, animal husbandry.

■ For citation: Hellstedt M. Use of biochar-peat mixture to reduce odour from animal farms. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N2. 27-30. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-27-30 (In English).

Использование смеси биоугля и торфа для снижения интенсивности запаха от животноводческих ферм

Маарит Хеллштедт,
maarit.hellstedt@luke.fi

Институт природных ресурсов (Луке), Финляндии

Реферат. Неприятный запах от сельскохозяйственных животноводческих предприятий доставляет определенные неудобства расположенным поблизости жилым и производственным объектам. Чтобы уменьшить проблему с запахом, в животноводческих помещениях и при хранении навоза могут быть использованы для укрытия различные материалы, включая подстилочные. (*Цель исследования*) Изучить возможность использования смеси биоугля и торфа в качестве присыпки для навоза, чтобы снизить интенсивность запаха на звероводческих фермах. (*Материалы и методы*) В лабораторных условиях исследовали свойства смеси биоугля и торфа для нейтрализации запаха. Свежий навоз от норок слоем 10 сантиметров поместили на дно 5-литрового тестового резервуара. Покрыли его смесью биоугля и торфа (в соотношении 50/50 по объему). Использовали 5 вариантов толщины покрытия. Непокрытый смесью навоз приняли за контрольный образец. Интенсивность запаха определяли обонятельным методом. Описали характер запаха. (*Результаты и обсуждение*) Выявили, что покрытие навоза смесью биоугля и торфа толщиной не менее 3 сантиметров способно значительно уменьшить запах. Характер запаха был сначала торфоподобным во всех покрытых смесью резервуарах, но при тонком покрытии через 2 дня он становился более похожим на запах навоза. Запах от резервуаров с покрытием большей толщины оставался торфоподобным в течение всего периода исследования. (*Выводы*) Рекомендовали применять присыпку из биоугля и торфа для нейтрализации аммиака и неприятного запаха от навоза на зверофермах. Показали, что частота применения и толщина слоя смеси зависят от температуры окружающей среды, зимой присыпать навоз не требуется.

Ключевые слова: эмиссия, нейтрализация неприятного запаха, раздражающее воздействие, биоуголь, торф, животноводство.

Для цитирования: Хеллштедт М. Использование смеси биоугля и торфа для снижения интенсивности запаха от животноводческих ферм // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №2. С. 27-30. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-27-30.

Agriculture is the most significant source of Ammonia emission that causes e.g. odour problems and loss of Nitrogen from agricultural systems. Manure is the main source of odour [1]. Odour causes local nuisance to the neighborhood. Litter and cover materials can be used in animal housing and in storage of manure to reduce both the odour problem and to tighten the nutrient cycles.

According to previous studies different covering materials can be used to reduce odour from manure storages (Table). According to a farm-scale study, that contains a fine lightweight powder that improves the density of the covering layer, was the most effective one [2]. Their results refer to that a dense surface cover reduces odour remarkably. In an laboratory study all other coverings tested reduced odour emissions significantly but thin layers of wood chips and wheat straw which were ineffective to reduce odour emissions [3].

Table			
THE EFFECT OF DIFFERENT COVERING MATERIALS ON THE EMISSION OF AMMONIA AND ODOUR			
Covering material	Layer thickness, mm	Reduction of odour, %	
		farm-scale	laboratory-scale
Chopped straw	50-150	83.8	–
Chopped wheat straw	70 140	– –	0 61
Maize stalks	70 140	– –	73 90
Perlite (Pegülit M)	100	93	–
Perlite (Pegülit R)	100	30	–
Wood chips	70 140	– –	30 55
Expanded clay	70 140	– –	75 69
Vegetable oil	3 9	– –	51 52
Tent roof	–	81.9	–

Peat is known as an effective cover material, but its use as a non-renewable resource is questionable whereas renewable biochar could have some additional benefits regarding e.g. the end-use of manure [4-6]. Biochar has the potential to bind nitrogen on its surfaces and slow the diffusion of gases from manure to the atmosphere [7]. The use of biochar as a litter for fur an-

imal manure, as described in this paper, is a new innovation and possibility to minimize the emissions from fur animal farms. In a field study biochar was spread under the cages on a fur farm. The researchers noticed that it was possible to considerably reduce the odour if biochar was spread approximately every 10th day [8].

THE RESEARCH PURPOSE is to estimate the potential of a mixture of biochar and peat to reduce the odour from fur farms. The study was an experimental part of a project developing a novel way of recycling nutrients from fur farms.

MATERIALS AND METHODS. The potential of a mixture of biochar and peat for the odour control on farms was tested in a laboratory study. The test was carried out in the beginning of April 2018. The average temperature of the test chamber was $17.8^{\circ}\text{C} \pm 2.9$ and the average relative humidity $36.5\% \pm 5.7$. Mink manure was chosen to be used because of the common opinion that mink manure is more annoying than other manures. The mink manure used was fresh. It was collected directly from the farm on the same morning that the test was initiated. A 10 cm layer of manure was placed on the bottom of a 5 liter test bucket. The manure was covered with biochar-peat mixture (mixed in 50/50 ratio by volume) using five different covering thicknesses i.e. 0.5 cm; 1; 2; 3 and 5 cm. On top of these there was also a test bucket with 10 cm layer of mature compost of mixed fur manure (both mink and fox manure) included. Uncovered manure was used as a reference. Test buckets were covered with lids. The tests were performed in three replicates.

The odour emission was measured with an olfactometric method that is based on odour sensation of a person. Human nose is recognized to the best odour measuring device because odour is a very subjective concept [9]. A Nasal Ranger field olfactometer was used (Fig. 1). The inset picture shows the dilution dial located at the air intake of the unit, which is unseen by the odor assessor during use (100% carbon filtered air blank positions are marked with arrows) [10]. According to a comparison test values obtained by field and laboratory olfactometry are consistent [11, 12]. The odour was expressed as odour concentration. The measuring range used for the dilution was from 2 to 500. In addition also the character of the odour was described.

To start with the odour measurements the lids were taken off one by one and the measurements were made



Fig. 1. The field olfactometer in use



Fig. 2. Arrangement for the measurement; lids were used on the buckets between measurements (left), the olfactometer placed tightly on the bucket during measurement (right)

right after the lid was taken off (Fig. 2). The inset picture shows the dilution dial located at the air intake of the unit, which is unseen by the odor assessor during use (100% carbon filtered air blank positions are marked with arrows) [12]. The measurements were performed right after the test buckets were ready, and after 1, 2 d 5 and 6 days from the beginning of the test. On days 5 and 6 the measurements were done also 1 hour after the lids were removed.

RESULTS AND DISCUSSION. On the first measuring session the fresh manure was still cold and the odour measured was low. On the other measuring sessions the temperature of the manure had settled to the temperature of the chamber. According to the results a cover of 5 cm was able to prevent the odour from mink manure for the whole measuring period (Fig. 3). The effect of 3 cm cover was able to reduce the annoying odour for 2 days. The effect of thinner coverings lasted only for one day.

The character of the odour was at first peat-like for all covered buckets but with thin coverings (0.5 cm and 1 cm) the odour was changed to more manure-like after 2 days as that of 2 cm covering remained peat-like until the 5th day. The odour from buckets with thicker coverings was peat-like during the whole test period of 6 days. The measured odour from mature fur manure compost was low and had no annoying odour at all. The characterization of the odour from the compost was during all the sessions decomposed and peat-like.

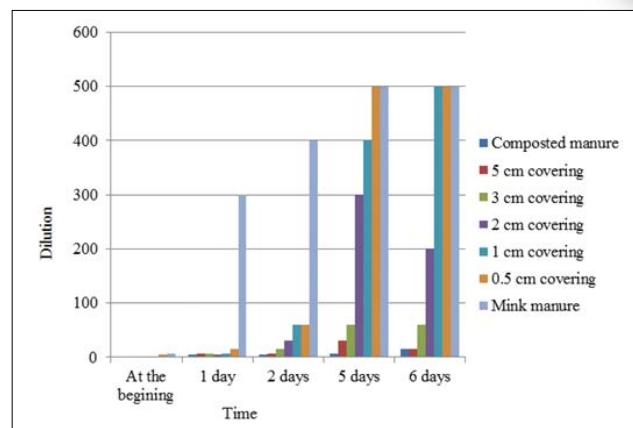


Fig. 3. Odour concentration measured from the covered and uncovered mink manure and also from the mature composted fur manure during the test period

The m ambient easurement on days 5 and 6 as the lids had been open for one hour showed reduction of odour on thin coverings and uncovered manure compared with the results of the just opened buckets (Fig. 4). The character of the odour was not changed due to opening the lids.

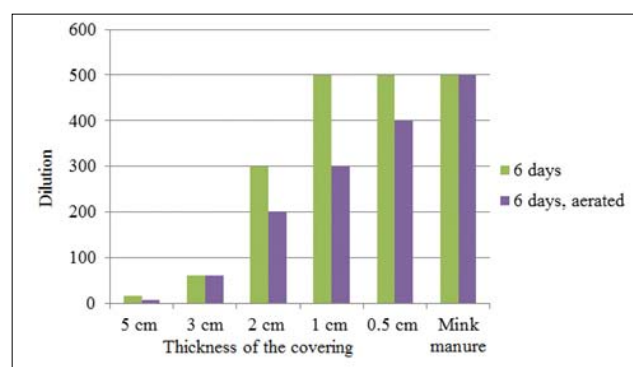
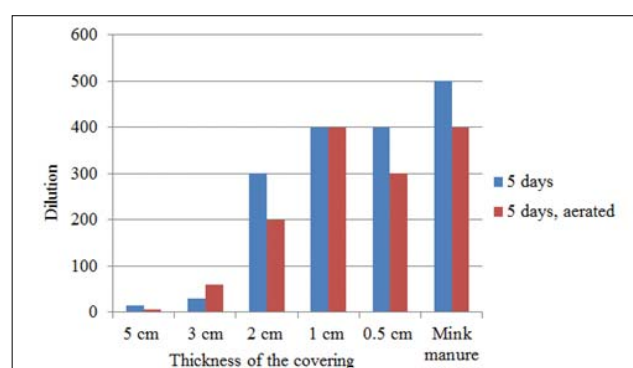


Fig. 4. Odour concentration measured from the covered and uncovered mink manure on days 5 (above) and 6 (below) just after the lids had been opened and 1 hour later

CONCLUSIONS. Biochar-peat covering reduced odour more the thicker the layer was. To reduce odour from fur manure a layer of 3 cm should be used and the adding of covering should be repeated every week. The relatively low humidity or ambient temperature in the test

chamber did not affect the results just like farm tests performed in Denmark [13]. On the other hand comparison of these emission values with other published odour emission values is difficult, due to the fact that there are only a few measurements done with fur animals and none of them focuses on manure storages.

The results, however, correspond to the measurements on gaseous emissions on fur farms in Finland which showed that a covering was able to reduce gas-

eous emissions and the beneficial effect of surface applied cover lasted for 7-10 days [14]. The results confirm also the observations of the field study [8] on the possibility to reduce odour from fur farms by using biochar. During cold periods as the temperature of the manure is very low or as the manure is frozen the odour level is much lower and covering of manure is not necessarily needed.

REFERENCES

1. Lyngbye M., Hansen M.J., Riis A.L., Jensen T.L., and Sørensen G. 1000 Olfactometry Analyses and 100 TD-GC/MS Analyses to Evaluate Methods for Reducing Odour from Finishing Units in Denmark. In Proceedings of the Workshop on Agricultural Air Quality. Washington, DC, USA. June 5-8. 2006. 138-152 (In English).
2. Hörnig G., Turk M., Wanka U. Slurry Covers to Reduce Ammonia Emission and Odour Nuisance. *J. Agric. Engng. Res.* 1999. Vol. 73. 151-157 (In English).
3. Guarino M., Fabbri C., Brambilla M., Valli L., Navarotto P. Evaluation of simplified covering systems to reduce gaseous emissions from livestock manure storage. *Transactions of the ASABE*. 2006. 49(3). 737-747 (In English).
4. Karlsson S. Measures to Reduce Ammonia Losses from Storage Containers for Liquid Manure. In: Proceedings of AgEng-96, Madrid, 23.-26. September 1996. Paper 96E-013 (In English).
5. Arnold M., Kuusisto S., Wellman K., Kajolinna T., Räsänen J., Sipilä J., Puumala M., Sorvala S., Pietarila H., Puputti K. Hajuhaitan vähentäminen maatalouden suurissa eläintuotantoyksiköissä [Reducing the odour annoyance from large animal production units]. VTT tiedotteita. 2006. Research Notes 2323. 74. (In Finnish).
6. Kapuinen P., Karhunen J. EPS-rakeet ja EPS-rouhe sikalan lietesäiliön katteena [EPS-granules and EPS-groats as coverings of slurry tanks in piggeries]. VAKOLAn tiedote 72. 1996. Vihti (In Finnish).
7. Taghizadeh-Toosi A., Clough T.J., Sherlock R.R., Condrol M.L. A wood based low-temperature biochar captures NH₃-N generated from ruminant urine-N, retaining its bioavailability. *Plant and Soil*. 2012. 353. 73-84 (In English).
8. Tiilikkala K., Holstila T., Rasa K. Testaus hitaan pyrolyysin soveltuvuudesta bio-massojen prosessointiin uusiksi tuotteiksi ja energiaksi. Loppuraportti [Testing the suitability of pyrolysis to process biobased materials into new products and energy. Final report]. 2013. <http://www.fskk.fi/index.php?section=126> (In Finnish).
9. Arnold M. Hajuhajearvojen perusteet [The line of argumentation for guide values of odour]. VTT Tiedotteita. Research Notes 1711. Espoo: VTT. 1995. 83. 14 (In Finnish).
10. McGinley M.A., McGinley C.M. Developing a Credible Odor Monitoring Program. In Proceedings American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Annual Conference Ottawa, ON, Canada: 1-4 August 2004 (In English).
11. McGinley M.A., McGinley C.M. Comparison of Field Olfactometers in a Controlled Chamber using Hydrogen Sulfide as the Test Odorant. In Proceedings International Water Association 2nd International Conference on Odour and VOCs. Singapore: 14-17 September 2003 (In English).
12. Benzo M., Mantovani A., Pittarello A. Measurement of Odour Concentration of Immissions using a New Field Olfactometer and Markers' Chemical Analysis. *Chemical engineering transactions*. 2012. Vol. 30. 103-108. DOI: 10.3303/CET1230018 (In English).
13. Nørregaard Hansen M. Quantification of odour emission from mink housing units. Test report. *AgroTech*. 2015. 36 (In English).
14. Hellstedt M., Regina K. The effect of biochar-peat mixture on the gaseous emissions from fur animal manure. In: Proceedings of the XIth international scientific congress in fur animal production, Helsinki, Finland. August 23 to 26, 2016 / Eds. A. Mäki-Tanila, J. Valaja, J. Mononen, T. Sironen and O. Vapalahti. *Scientifur* 40 ¾. 2016. 247-251 (In English).

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 28.03.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 28.03.2019

Статья принята к публикации 12.04.2019
The paper was accepted
for publication on 12.04.2019

Nitrogen Fertilization of Grass Leys: Yield Production and Risk of Nitrogen Leaching

Elena Valkama¹,
elena.valkama@luke.fi;
Katri Rankinen²;
Perttu Virkajärvi¹;

Tapio Salo¹;
Petri Kapuinen¹;
Eila Turtola¹

¹Natural Resources Institute Finland (Luke), Finland;

²Finnish Environmental Institute, Finland

Abstract. The soil surface balance of nitrogen (N), calculated as the difference between N inputs and output, is a principal agri-environmental indicator that provides information on the potential loss of N to surface or groundwater. (*Research purpose*) Determination of relevant models of yield response to N fertilization could prove helpful in minimizing N balance and simultaneously maintaining high-yield production. (*Materials and methods*) The authors used meta-analysis to quantitatively summarize 40 N fertilization experiments on perennial grass leys in Finland and assessed the effect of inorganic N fertilization on grass yields and N balances, and further estimated potential to reduce N input and N balances. The relationship was estimated by using the COUP model (a coupled heat and mass transfer model for 'soil-plant-atmosphere' systems) and by reviewing the 12 Nordic studies on N leaching experiments involving lysimeters and drained field plots. (*Results and discussion*) It was found that the optimal N content in mineral soils is 230 kilograms per hectare, in organic – 190. In the first case, the economic effect of nitrogen introduction is 206 euro per hectare, in the second one – 62. (*Conclusions*) The developed yield response models can serve to construct a dynamic tool for growers to adjust N applications for maximizing economic profitability. The authors proved that the values predicted by the COUP model for N leaching losses after the application of mineral N fertilizer to perennial grass leys were in accordance with the low values measured, which ranged from 1.2 to 10-15 kilograms per hectare a year in Finland and in the Nordic-Baltic countries. It was also revealed that a possible risk of N leaching losses when using only inorganic N fertilization seems less crucial due to its low level and weak association with N balances.

Keywords: yield; grass leys; nitrogen balance; nitrogen leaching; meta-analysis; coupled heat and mass transfer model.

For citation: Valkama E., Rankinen K., Virkajärvi P., Salo T., Kapuinen P., Turtola E. Nitrogen fertilization of grass leys: yield production and risk of nitrogen leaching. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N2. 31-39. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-31-39 (In English).

Внесение азотных удобрений на лугах и пастбищах: урожайность и риск азотного выщелачивания

Елена Валкама¹,
elena.valkama@luke.fi;
Катри Ранкин²;
Пертту Виркярви¹;

Тапио Сало¹;
Петри Капуинен¹;
Эйла Туртола¹

¹Институт природных ресурсов Финляндии (Луке), Финляндия

²Финский институт окружающей среды, Финляндия

Реферат. Баланс содержания азота в верхнем слое почвы, рассчитанный как разница между количеством внесенного и остаточного азота, считается основным агроэкологическим показателем, который предоставляет информацию о возможном выносе азота с поверхностными или грунтовыми водами. (*Цель исследования*) Определить модели зависимости урожайности зеленой массы от количества внесенного азотного удобрения, которые могут быть использованы для минимизации баланса азота и одновременного поддержания высокого урожая трав. (*Материалы и методы*) На основе мета-анализа осуществили количественную оценку результатов 40 опытов по азотной подкормке многолетних травяных угодий в Финляндии. Изучили влияние неорганического азотного удобрения на

урожай трав и баланс азота, а также перспективы снижения потребления азота и баланса азота. Для оценки использовали сопряженную модель тепломассопереноса для систем «почва – растение – атмосфера». Осуществили 12 экспериментов по выщелачиванию азота в северных широтах. Провели лизиметрические исследования. Изучили осушенные участки лугов и пастбищ. (*Результаты и обсуждение*) Установили, что оптимальное содержание азота в минеральных почвах составляет 230 килограммов на гектар, в органических – 190. В первом случае экономический эффект от внесения азота равен 206 евро на гектар, во втором – 62. (*Выводы*) Разработали модели влияния на урожайность трав, которые сельхозпроизводители могут использовать в качестве динамического инструмента для регулирования нормы внесения азота, чтобы получить максимальный экономический эффект. Показали, что значения, прогнозируемые с помощью сопряженной модели тепломассопереноса для оценки потерь азота вследствие выщелачивания после внесения минерального азотного удобрения на многолетние травяные угодья, соответствовали низким фактическим показателям, полученным в ходе исследования, которые варьировались от 1,2 до 10-15 килограммов на гектар в год в Финляндии и в северных балтийских странах. Выявили, что возможный риск потерь азота вследствие выщелачивания при использовании только неорганического удобрения представляется менее критичным из-за низкого уровня этого элемента и его слабой связи с балансом азота.

Ключевые слова: урожайность; травяные угодья; азотный баланс; выщелачивание азота; мета-анализ; сопряженная модель тепломассопереноса.

■ Для цитирования: Валкама Е., Ранкинен К., Виркаярви П., Сало Т., Капуинен П., Туртола Э. Внесение азотных удобрений на лугах и пастбищах: урожайность и риск азотного выщелачивания // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №2. С. 31-39 DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-31-39.

In the Nordic-Baltic countries, grass leys usually receive substantial amounts of N fertilizer, which may lead to high N balances of up to 130 kg ha⁻¹ yr⁻¹ [1]. Reducing N inputs should prove to be an effective environmental practice that directly affects soil N balances, as demonstrated for spring cereals [2]. Moreover, adjusting N input according to yield response models causes no economic loss.

Soil surface N balance is a principal agri-environmental indicator that provides information on the potential loss of N to surface or groundwater. However, the link between N balance and N leaching loss from grass leys as well as from cereals measured at field and catchment scales is often complex and may vary widely across different soils, crops, N sources and managements [1, 3, 4]. For grasses, in only a few studies on sandy soils, did researchers calculate the regressions for ungrazed [5] and grazed [6] grassland fertilized with both inorganic N fertilizers and slurry. According to the regressions, for example, an average European N balance of 65 kg ha⁻¹ yr⁻¹ [7] would correspond to an N leaching loss of 18 kg ha⁻¹ yr⁻¹ [5] or 30 kg ha⁻¹ yr⁻¹ [6]. Although these losses seem adequate for slurry applications, they may represent overestimations when applying only inorganic fertilizer to ungrazed grassland.

THE RESEARCH PURPOSE is to explore the relationships between N rates and grass yield responses, N balances, and N leaching loss, after applying only inorganic N fertilizer to ungrazed perennial grass leys.

MATERIALS AND METHODS. For this purpose, we summarized 40 relevant Finnish field experiments conducted on mineral and organic soils during the last five decades and estimated the potential to reduce N balances without sacrificing yield. We further estimated

N leaching losses from N balances by using the COUP model and by reviewing the 12 Nordic studies on N leaching experiments involving lysimeters and drained field plots.

The database of grass yield response to inorganic N fertilization consisted of published and unpublished reports of experiments conducted at MTT Agrifood Research Finland (Jokioinen, Finland) and other Research Stations. The main grass species were timothy (*Phleum pratense* L.), meadow fescue (*Festuca pratensis* L.), cocksfoot grasses (*Dactylis glomerata*), and a mixture of them. In addition, two studies included tall fescue (*F. arundinacea*) and brome grass (*Bromus inermis*).

Altogether 40 experiments took place between 1957 and 2004 at 17 sites on clay – 11 studies, coarse-textured mineral soils – 21 studies and organic soils – 8 studies (Fig. 1). A total of 28 studies reported ranges of soil pH, determined in water suspension, from 4.7 to 7, and of the precise soil organic matter (SOM) content in topsoil, from 2.5 to 45.7%. Four studies reported SOM content as a class (“medium”, 3-6%, or “rich”, 6-12%), while the remaining eight studies failed to report it. Fertilizer P (mean 40 kg ha⁻¹) and K (mean 100 kg ha⁻¹) were applied according to the existing recommendations in order to provide sufficient amounts for grass growth. The annual application of N ranged from 50 to 600 kg ha⁻¹.

Response and explanatory variables

As response variables, the database for the meta-analysis included the total DM of the grass leys (kg ha⁻¹) and N balance (kg ha⁻¹ yr⁻¹). We calculated the soil surface N balance as described in [8]:

$$N \text{ balance (kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}) = N \text{ input (kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}) - N \text{ output (kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}), \quad (1)$$

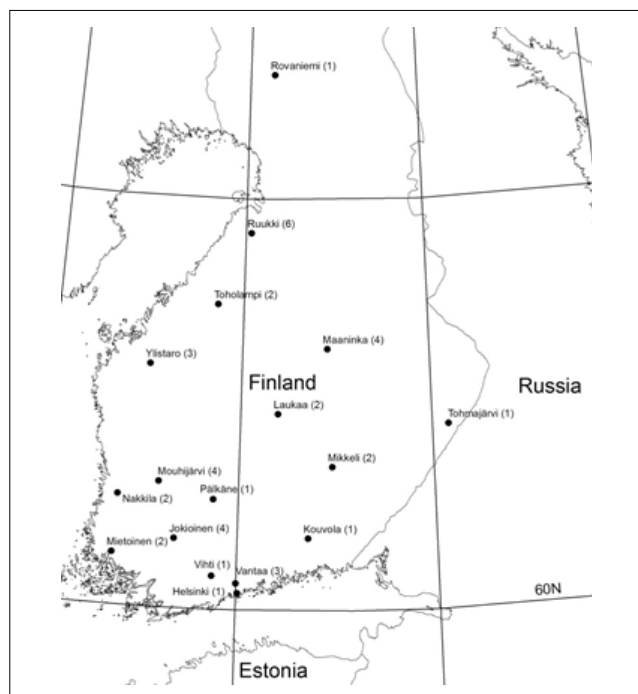


Fig. 1. Location of 40 Finnish N fertilization experiments on grass leys (number of experiments in parenthesis)

where N_{input} was N applied as inorganic fertilizers;
 N_{output} was the N content in the harvested yield.
 We calculated N output as follows:

$$N_{output} (kg ha^{-1}) = Protein (\%) / a \times DM Yield (kg ha^{-1}) / 100 (\%), \quad (2)$$

where a is a coefficient equal to 6.25.

From the output we excluded any N lost to the environment through the volatilization of ammonia or denitrification, or leaching, as well as from N input asymbiotic N fixation and atmospheric deposition, the latter in Finland amounting to 4–6 kg ha⁻¹ [9]. A negative N balance thus roughly indicates depletion of the soil N stocks, whereas a positive balance correlates to accumulation that can increase the risk of losses to the environment.

Effect size calculation

Meta-analysis and the Meta Win 2.0 statistical program served to analyze the effects of N fertilization on grass yield and N balance [10]. For yield data, we used the response ratio (the ratio of mean outcome in the experimental group to that in the control group) as an index of the effect size [11]. We calculated a separate estimate of the natural logarithm of the response ratio for each site, N rates and randomly selected grass species as:

$$\ln r = \ln(\bar{X}_{PKN} / \bar{X}_{PK}), \quad (3)$$

where $\bar{X}_{PKN}$ and $\bar{X}_{PK}$ represent yield means for PKN and PK (i.e., the control) treatments, respectively, averaged

over the duration of an experiment. S_{PKN} and S_{PK} are the corresponding standard deviations, and n_{PKN} and n_{PK} are the sample sizes equal to the duration of an experiment in years. To measure the effect of explanatory variables on yield response and to exclude the effect of increasing N rates, we selected one N rate, between 117 and 208 kg N ha⁻¹ with a mean of 158 kg N ha⁻¹, per study to ensure statistical independence of $\ln r$.

We then back-transformed log response ratios and reported them in the text as percentage changes from the control:

$$Yield response (\%) = [\exp(\ln r) - 1] \times 100. \quad (4)$$

We considered responses due to N fertilizer to be significantly different from the control if their 95% CIs did not overlap with zero.

Yield response models

Data for yield response models of mineral soils were available from 23 early and 9 recent experiments, from which we randomly selected one grass species or grass mixture and one N rate per study to ensure statistical independence of $\ln r$. However, due to the small number of studies on organic soils (five early and three recent studies), we selected one grass species or grass mixture and two to three N rates per study, resulting in 20 observations.

We tested possible sources of variation prior to building a model. To develop a model, we pooled experiments in which variances in the yield response showed no significant difference from those predicted by sampling error alone. We used a two-dimensional Gaussian function to describe the relationship between rising N rates, $N_0 yield$ and yield response:

$$\ln r = ae^{-0.5 \{ [(N_0 yield - x_0)/b]^2 + [(N - y_0)/c]^2 \}}, \quad (5)$$

where $\ln r$ is the yield response;

$N_0 yield$ is the control yield without added N;

N is N rates;

b and c are standard deviations of x and y , respectively;

x_0 and y_0 is the center of the model;

a is amplitude.

We ran the models using the SigmaPlot 12.0 program (SYSTAT Software, San Jose, CA, USA) with weights defined by the reciprocal of the sample variance. The Shapiro-Wilk test served to determine whether the weighted residuals (observed yield increase – estimated yield increase) of the model were normally distributed (SYSTAT Software).

Calculation of economically optimal N rates (N_{opt})

The following calculation served to derive the grower's profit from the application of N [12]:

$$\begin{aligned} \text{Profit (€ ha}^{-1}\text{)} = & \\ = & [\text{Yield increase due to N fertilization (kg ha}^{-1}\text{)} \times \\ & \times \text{DM yield value (€ kg}^{-1}\text{)}] - [\text{Applied N (kg ha}^{-1}\text{)} \times \\ & \times \text{N fertilizer price (€ kg}^{-1}\text{)}]. \end{aligned} \quad (6)$$

We considered the profit from the application of N optimized when the difference between the extra income due to the yield increase and the cost of the N fertilizer was at its peak value. The average value of the yield increase term originated from the two-dimensional Gaussian function (Eq. 5). In calculating examples of N_{opt} , we set the average $N_0yields$ to 3900 and 4500 kg ha⁻¹ for mineral and organic soils, respectively, and the high $N_0yields$ to 6000 and 8000 kg ha⁻¹, respectively. We calculated examples of N_{opt} for the prices of N fertilizer (1 € kg⁻¹) and the DM yield values of grass leys (0.1 € kg⁻¹), thus yielding a fertilizer N-to-yield price ratio of ten.

Linear regression analysis

We used a simple linear regression to examine the relationship between N rates and N balances:

$$N_{bal} = y_0 + aN, \quad (7)$$

where N_{bal} is the N balance (kg ha⁻¹ y⁻¹);

N is the N fertilizer rate (kg ha⁻¹);

y_0 is the intercept parameter;

a is the slope parameter.

We derived data from 21 early and 7 recent studies on mineral soils and 4 early and 3 recent studies on organic soils. To avoid bias, we randomly selected one grass species and one N rate per study for the linear regressions, and the average annual N balance for the duration of an experiment served as a dependent variable. We also tested the data for normal distribution and equal variance.

COUP model

Precipitation is one of the main drivers of N leaching. However, field experiments typically represent a limited combination of weather conditions, soils and cultivation practices; therefore, we used climatic data from several years as the driving force to simulate a larger set of N leaching values. The mathematical model COUP is a dynamic, process-based model for calculating water and heat flux as well as combined carbon (C) and N cycles in soil profiles [13]. In the present study, we applied the model by using data on the measured physical and chemical soil properties of two practical grass fields (fields 7 and 8) under cattle husbandry [14]. In total, we simulated 96 combinations of weather conditions and cultivation practices. Instead of a hydrological or agricultural year (from autumn to autumn), we used a calendar year to allow sufficient time for N leaching. The physical and chemical conditions on the field were always the same in the beginning of the simulation, and differences in simulated N leaching resulted from different rainfalls and temperatures throughout the year.

Due to a lack of runoff water collectors in the practical grass fields, we calibrated the model against measurements of soil mineral N concentrations in spring and autumn, as well as crop N uptake. Rankinen

et al. [14] previously described the original calibration.

The modeled cases included first-year grass, one year from the middle of the rotation, and the ploughing year (after three years' of grass rotation). We then modeled N leaching and N balances to obtain the theoretical upper and lower limits for their relationship by changing the fertilization amounts in steps of 20 kg N ha⁻¹. The simulations covered the range of the N balance from -100 to 150 kg ha⁻¹. We simulated a set of individual cases by using one-year datasets for the entire five-year period. We therefore did not include simulated N accumulation in the soil, but started all annual simulations from the observed physical and chemical properties of the soil.

RESULTS AND DISCUSSION

Yield response models

We developed the models separately for mineral and organic soils, and since N_0yield substantially affected the yield responses, we included it as an independent variable along with N rates (Table 1). The coefficients of determination (R^2) indicated that the N rate and $N_0yields$ together accounted for 80-95% of the variation in the yield response of grass leys.

Table 1 PARAMETERS AND FITTINGS OF THE WEIGHTED MODELS DESCRIBING THE RELATIONSHIP BETWEEN YIELD WITHOUT ADDED N (N_0YIELD , KG HA ⁻¹), N RATE (N, KG HA ⁻¹) AND YIELD RESPONSE (LN r) ON MINERAL AND ORGANIC SOILS								
Soil type	$ln\ r = ae^{-0.5}\{[(N_0yield - x_0)/b]^2 + [(N - y_0)/c]^2\}$							
	a	x_0	b	y_0	c	R^2	F_{test}	n
Mineral	3010	-62253	16429	466	383	0.80	28	32
Organic	135	-35349	12067	345	214	0.95	87	20

Bold numbers indicate $P < 0.0001$;
 n indicates number of experiments for mineral soils and number of observations for organic soils. For back-transformation of $ln\ r$, see Equation 4.
The models are valid for N rates >50 kg ha⁻¹ (mineral soils) and N rates >75 kg ha⁻¹ (organic soils).

The models estimated that the yield response to N rates decreased considerably with increasing N_0yield (Fig. 2). On mineral soils, for example, the largest yield response over that of the control dropped from 318% ($ln\ r = 1.43$) to 70% ($ln\ r = 0.54$) while increasing the N_0yield from 2000 to 6000 kg ha⁻¹ (Fig. 2a). Respectively, on organic soils, the largest response dropped from 200% ($ln\ r = 1.1$) to 23% ($ln\ r = 0.21$) while increasing the N_0yield from 2000 to 8000 kg ha⁻¹.

N balance

We performed the linear regression analysis between rising N rates and N balance (Fig. 3, Table 2). The coefficient of determination (R^2) indicated that 86-88% of the variation in the N balance stemmed from its relationship with the N rates. On mineral soils, an increase of 10 kg N ha⁻¹ associated with an average increase of 4.8 (4.1-5.6) kg ha⁻¹ yr⁻¹ in the N balance,

and on organic soils, with an average increase of 6.4 (3.4-9.4) $\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$, respectively. According to the regressions, adding no N fertilizer yielded an N balance equal on average to -53 (-71 to -35) $\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ on mineral soils and to -123 (-203 to -42) $\text{kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ on organic soils. We expected a zero N balance at average N rates of 110 and 192 kg ha^{-1} in mineral and organic soils, respectively.

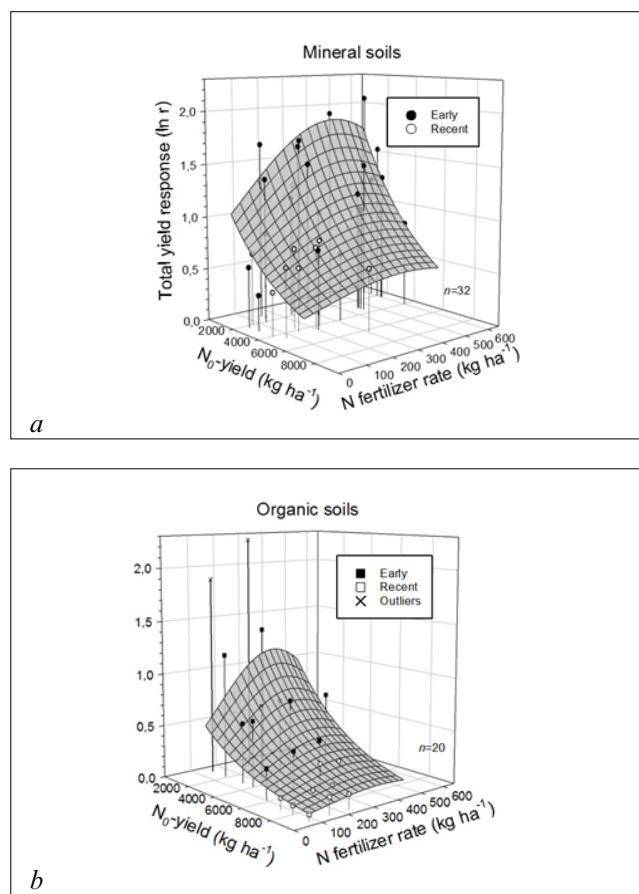


Fig. 2. Total yield response of grass leys ($\ln r$) in relation to the N fertilizer rate and control yield without added N ($N_0 \text{ yield}$) on (a) mineral and (b) organic soils in early (1950s-1970s) and recent (1990s-2000s) studies. Each symbol represents the average yield response for the duration of an experiment; n represents the number of experiments in (a) and the number of observations in (b). For back-transformation of $\ln r$, see Equation (4)

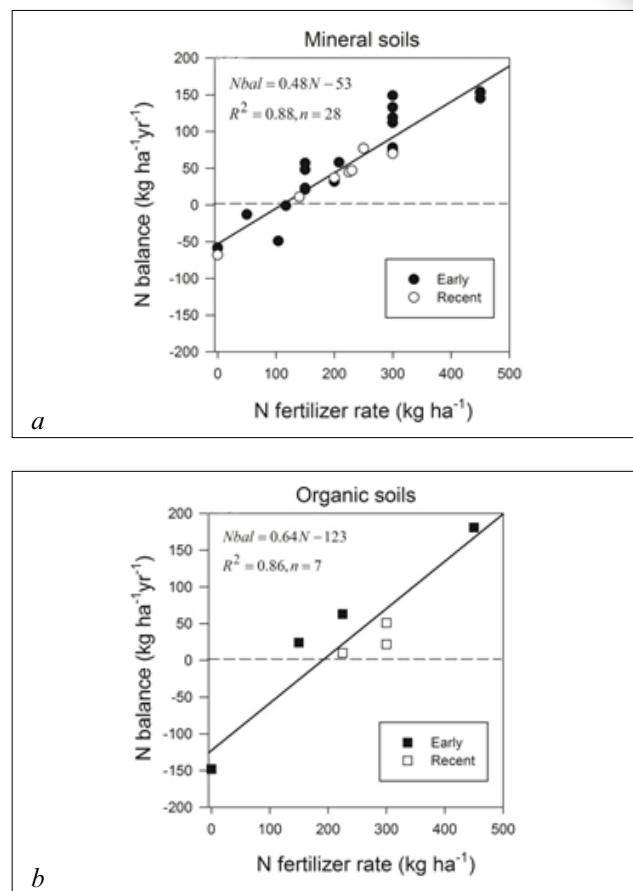


Fig. 3. The relationship between increasing N fertilizer rates and N balances on (a) mineral and (b) organic soils in early (1950s-1970s) and recent (2000s) studies (each symbol represents the average annual N balance for the duration of an experiment; n represents the number of experiments)

Observed and simulated N leaching loss from mineral soils

The review of published Nordic studies showed that the smallest observed annual N leaching loss was 1.2 kg ha^{-1} from clay soil and the largest value was 13 kg ha^{-1} from sand soil (Fig. 4a). Within the range of observations, N leaching showed no clear relationship with N balances. For example, a large range of N balances (e.g., -80 to $105 \text{ kg ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$) across several experiments yielded annual N leaching losses as low

Table 2

PARAMETERS AND FITTINGS OF THE LINEAR REGRESSION, $N_{BAL} = y_0 + aN$ DESCRIBING THE RELATIONSHIP BETWEEN THE N FERTILIZER RATE (N, KG HA ⁻¹) AND N BALANCE (N_{BAL} , KG HA ⁻¹ Y ⁻¹) ON MINERAL AND ORGANIC SOILS										
Soil type	Coefficients		<i>t</i>	<i>P</i>	95% CIs		<i>R</i> ²	F test	<i>P</i>	<i>n</i>
					Low	Up				
Mineral	<i>y</i> ₀	−53	−6.1	****	−71	−35	0.88	194	****	28
	a	0.48	13.9	****	0.41	0.56				
Organic	<i>y</i> ₀	−123	−3.9	*	−203	−42	0.86	31	**	7
	a	0.64	5.5	**	0.34	0.94				
* <i>P</i> < 0.05; ** <i>P</i> < 0.01; *** <i>P</i> < 0.001; **** <i>P</i> < 0.0001; CIs, confidence intervals; n, number of experiments										

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$; **** $P < 0.0001$; CIs, confidence intervals; n , number of experiments

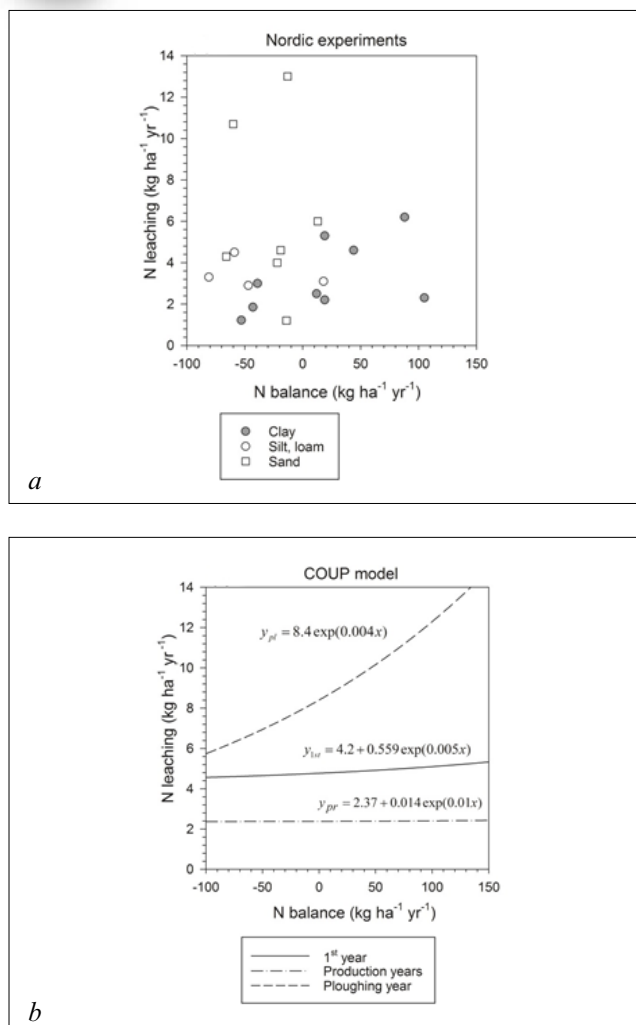


Fig. 4. Leaching losses:

a – values of N leaching losses and N balances measured after the application of mineral N fertilizer to perennial grass leys in Nordic experiments; b – simulated N leaching losses on mineral soils in relation to N balances for different years of grass production (The observed values in (a) were averaged over the duration of an experiment)

as 2-4 kg ha⁻¹ (Fig. 4a). On the other hand, with a narrow range for the N balance (e.g., 10-20 kg ha⁻¹ yr⁻¹), N leaching losses varied from 2.2 to 6.0 kg ha⁻¹ yr⁻¹.

Simulated N leaching loss for the first year of grass production increased slowly, by 0.6 kg ha⁻¹ yr⁻¹, with an N balance rising from -100 to 100 kg ha⁻¹ yr⁻¹ (Fig. 4b). During production years, the N leaching loss was low (2.4 kg ha⁻¹ yr⁻¹) for the range of N balances. In contrast, for the last year of grass production involving autumn ploughing and bare soil over the following winter, simulated N leaching increased from 5.6 to 12.5 kg ha⁻¹ yr⁻¹ when N balances rose from -100 to 100 kg ha⁻¹ yr⁻¹. An N input of 110 kg ha⁻¹ would then yield a zero N balance and an N leaching loss of 8.4 kg ha⁻¹ yr⁻¹. In the driest year, however, when the simulated runoff from fields was about 210 mm, simulated N leaching during the ploughing year was low (about 2.7 kg ha⁻¹ yr⁻¹) regardless of rising N balances.

Regarding organic soils under grass leys, we were unable to simulate N leaching losses after the application of mineral N fertilizer or to survey articles published in Nordic countries due to lack of data and experiments.

Estimates of N_{opt} , respective N balance and N leaching loss

We estimated N_{opt} separately for average and high N_0 yields and compared them to the Finnish Agri-Environmental Programme's maximum permissible N rates (N_{max}) [15]. For both mineral and organic soils, N_{opt} clearly depends on N_0 yields: to maximize profit, a field with high N_0 yields requires only 20-40% of the N fertilizer needed for a field with average N_0 yields, resulting in negative N balances (Table 3).

For the average N_0 yields in mineral soils, estimates demonstrated that at a fertilizer N-to-yield price ratio of ten, N_{opt} is equivalent to the permitted N_{max} (230 kg ha⁻¹) for soils rich in SOM, yielding an N balance of 57 kg ha⁻¹ yr⁻¹ and a simulated N leaching loss of 2.4-10.6 kg ha⁻¹ yr⁻¹. In contrast, the application of permitted N_{max} to fields

Table 3

ESTIMATES OF YIELD INCREASE, GROWERS' PROFIT, N BALANCE AND N LEACHING LOSSES AFTER THE APPLICATION OF N_{opt} OR N_{max} TO MINERAL AND ORGANIC SOILS WITH AVERAGE AND HIGH N_0 YIELDS

Estimates	Mineral soils			Organic soils		
	N_{opt}^*		N_{max}^{**}	N_{opt}		N_{max}
	230	50	230	190	75	190
N_0 yield (kg ha ⁻¹)	3900 (average)	6000 (high)	6000 (high)	4500 (average)	8000 (high)	8000 (high)
Yield increase due to N (kg ha ⁻¹)	4400	2100	3400	2500	800	1400
Profit from N fertilizer (€ ha ⁻¹)***	206	159	106	62	6	-48
N balance (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹)	57	-29	57	-1	-75	-1
Simulated N leaching losses (kg ha ⁻¹ yr ⁻¹) ****	2.4-10.6	2.4-7.5	2.4-10.6	Not simulated		

* N_{opt} , economically optimal N rates (kg ha⁻¹).

** N_{max} , the Finnish Agri-Environmental Programme's maximum permissible N rates (kg ha⁻¹).

***The prices of N fertilizer (1 € kg⁻¹) and the DM yield values of grass leys (0.1 € kg⁻¹). Fertilizer N-to-yield price ratio of ten.

****The low and upper values indicate production and ploughing years, respectively.



with the high N_0 yields would be uneconomically high and could be therefore reduced to 50 kg ha^{-1} . However, despite the considerably lower N rate and N balance attained, and even negative values for the latter, the simulated annual N leaching loss would decrease by only 3.1 kg ha^{-1} .

Similarly, in organic soils with average N_0 yields, N_{opt} is equivalent to N_{max} (i.e., 190 kg ha^{-1}), resulting in an N balance of about zero. Again, in fields with high N_0 yields, N rates could be reduced up to 75 kg ha^{-1} , since the application of N_{max} to such fields would pose a financial burden on growers. This practice would reduce the N balance to $-75 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. For organic soils, we were unable to assess the associated environmental impact.

Yield response

From the growers' point of view, fertilizer applications should be based on relevant yield response models and be economically justified. However, year-to-year, site-specific and climatic variability leads to numerous response curves as well as uncertainty in estimating N_{opt} . To overcome these challenges, we applied meta-analysis in the present study to test the sources of variation and to improve the robustness and reliability of the yield response curves. They were fitted to average grass yield increases over the duration of an experiment and to a large number of experiments on different soils located at 17 sites with growth periods ranging from 130 to 175 days. In our previous meta-analysis of cereals, the N_0 yield was a major factor governing the magnitude of the yield response to N fertilization [2]. In this study we included the N_0 yields as a continuous variable that enabled improvement of the models' reliability ($R^2 = 0.80-0.95$).

Although SOM is broadly recognized as an important parameter affecting soil quality and crop yield, large dataset analyses of cereals have shown either its weak correlation with N_0 yield [2] or no statistically significant correlations at all [16]. The latter result agreed with that of the present study on grass leys. We suggest that the variations in N_0 yield observed in the present study were determined largely by unaccounted factors such as e.g., soil structure. Soil structure can influence crop yields by affecting root growth and distribution, soil aeration, water availability, as well as soil microbial activity and nutrient cycling.

In light of the present results, current fertilizer recommendations, which are based on the grower's yield expectation (i.e., the higher the expected yield, the higher the N fertilization), do not lead to optimal N management. Indeed, the N_{max} permitted by FAEP on a field without consideration of its N_0 yield and responsiveness may be unnecessarily high and lead to excessive N inputs and thus to economic losses for a grower. According to the models, on low responsive fields the application of permitted N_{max} would lead to

a yield increase of 1000 kg ha^{-1} less than on highly responsive fields, regardless of the soil type. Thus, the yield response models developed in the present study can contribute to the construction of a dynamic tool for growers to more effectively adjust N applications in order to maximize economic profitability. However, such a tool would require growers to estimate the magnitude of N_0 yields from his fields by, for example, leaving some representative areas unfertilized for a few years.

N balance and N leaching loss

This study showed that N rates explained a large part of the variation (86-88%) in N balances for grass leys, which agrees with the results of our previous study on cereals [2], and the effect of N fertilization on N balance was consistent across the studies. The results also indicate that for grass production on mineral soils, as with wheat production, an increase of 10 kg ha^{-1} in fertilization associated with about 5 kg ha^{-1} increase in the N balances [2].

On organic soils, the application of N_{max} permitted by the FAEP (i.e., 190 kg ha^{-1}), the N balance would be approximately zero. On mineral soils, the larger N_{max} (230 kg N ha^{-1}) would result in an N balance of $57 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, slightly exceeding the average national N balance of $50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ [9]. In particular, growers could reduce N inputs on mineral soils with high N_0 yields considerably, down to 50 kg ha^{-1} , and the N balance down to $-29 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ with no economic loss. Similarly, the respective cases for spring wheat production have the potential to reduce N inputs from 120 to 45 kg ha^{-1} and the N balance from 33 to $-5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ with no economic loss [2].

The values predicted by the COUP model for N leaching losses after the application of mineral N fertilizer to perennial grass leys were in accordance with the low values measured, which ranged from 1.2 to $10-15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ in Finland [5] and in the Nordic-Baltic countries [17, 18]. Numerous studies demonstrated that N leaching losses from perennial grassland are inherently smaller than those from arable land, since N uptake covers a longer period and the soil normally remains untilled for at least three years, thereby reducing N leaching [19-21].

Even with wide variation across management regimes and years, a recent Danish study of grasslands under different grazing, cutting and manure treatments found that N surpluses related only weakly to N leaching and accounted for only 5% of the variation, thus revealing the huge capacity of soils to accumulate large N inputs [3]. The model in the present study predicted a weak relationship between N leaching losses and N balances on mineral soils, but only for inorganic N input. Even in a ploughing year, when N leaching losses were expected to rise due to mineralization and the accumulation of inorganic N in the soil [22], simulated

N losses rose by only $6.9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, when N balances rose considerably by $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$.

Assessments have shown that, along with the low N leaching loss, also the volatilization of ammonia and nitrous oxide from grass leys on mineral soils with the recommended rates of mineral N fertilizers have been low, about 1 and $1.5\text{--}4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, respectively [9, 23]. This indicates that an N balance of $57 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ contributes to a residual soil N pool that amounts to about $40\text{--}50 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$. In grasslands, the largest pool of N is SOM, and since the net N mineralization rate is generally low, the residence time of N in SOM in most undisturbed grasslands would be decades or even centuries [24].

However, the ploughing of grass leys receiving mineral fertilizer with the subsequent cultivation of spring cereals may either return N leaching losses to the pre-ley levels [25] or slightly raise it by $3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ during the two to three years after ploughing [26]. In the cereal phase of grass-arable rotation, the under-sowing of non-legume catch crops, such as ryegrass, is considered an effective strategy for avoiding N losses [27]. A recent meta-analysis confirmed that using catch crops in spring cereal production reduced N leaching losses by 50% across the range of soils and weather conditions in the Nordic countries [28].

Along with commercial fertilizers, the use of animal manure on grasslands is commonplace. On a catchment scale, N balances in areas that received manure applications

are often higher than those that received only mineral fertilizer [1]. In addition to the quantity of N applied, N losses from manure depend on several other factors, such as the timing and method of application, particularly in relation to subsequent rainfall [20]. In contrast to inorganic N input, the application of slurry can lead to higher N leaching losses of up to $60\text{--}190 \text{ kg ha}^{-1}$ [3, 5]. In grazed pasture, the potential for N leaching increases more than five-fold that of mowed pastures [29], since a large proportion (between 60–90%) of the N ingested returns to the soil pasture system as urine and manure.

CONCLUSIONS. In grass ley production, N fertilizer management should aim for N_{opt} as determined by $N_0\text{yields}$. Otherwise, N input may be unnecessarily high, leading to economic losses for growers. We propose that unaccounted factors, such as soil structure, largely caused the variations in $N_0\text{yield}$ observed in the field experiments summarized in the present study. Growers are therefore encouraged to estimate the magnitude of $N_0\text{yields}$ directly from their fields by, for example, leaving some representative areas unfertilized for a few years. On mineral soils, however, concerns about the risk of N leaching losses when using only inorganic N fertilization seems less crucial due to its low level and weak association with N balances. Further research is needed to explore the relationship between N balances and N leaching on organic soils.

REFERENCE

1. Bechmann M., Blicher-Mathiesen G., Kyllmar K., Iital A., Lagzdins A., Salo T. Nitrogen application, balances and their effect on water quality in small catchments in the Nordic-Baltic countries. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2014. 198. 104–113 (In English).
2. Valkama E., Salo T., Esala M., Turtola E., Nitrogen balances and yields of spring cereals as affected by nitrogen fertilization in northern conditions: a meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2013. 164. 1–13 (In English).
3. Eriksen J., Askegaard M., Rasmussen J., Søgaard, K. 2015. Nitrate leaching and residual effect in dairy crop rotations with grass-clover leys as influenced by sward age, grazing, cutting and fertilizer regimes. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2015. 212. 75–84 (In English).
4. Hansen E.M., Munkholm L.J., Olesen J.E., Melander B. Nitrate leaching, yields and carbon sequestration after noninversion tillage, catch crops, and straw retention. *J. Environ. Qual.* 2015. 44. 868–881 (In English).
5. Salo T., Turtola E. Nitrogen balance as an indicator of nitrogen leaching in Finland. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2006. 113. 98–107 (In English).
6. Wachendorf M., Büchter M., Trott H., Taube F. Performance and environmental effects of forage production on sandy soils. II. Impact of defoliation system and nitrogen input on nitrate leaching losses. *Grass Forage Sci.* 2004. 59. 56–68 (In English).
7. European Environment Agency. Nitrogen balance per hectare of agricultural land. 2015. <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/nitrogen-balance-per-hectare-of-agricultural-land#tab-european-data>. Web address verified 05.04.2019 (In English).
8. OECD. Environmental Indicators for Agriculture, Methods and Results. Organization for economic co-operation and development. Paris. France. 2001 (In English).
9. Salo T., Lemola R., Esala M. National and regional net nitrogen balances in Finland in 1990–2005. *Agric. Food Sci.* 2007. 16. 366–375 (In English).
10. Rosenberg M.S., Adams D.C., Gurevitch J. Metawin: Statistical Software for Meta-analysis, Version 2.1. Sinauer Associates, Inc, Sunderland. 2000. MA, USA (In English).
11. Hedges L.V., Gurevitch J., Curtis P.S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecol.* 1999. 80. 1150–1156 (In English).
12. McConnell D.J., Dillon J.L. Optimization of resource use levels: response analysis, in: McConnell, D.J., Dillon J.L. (Eds.). Farm management for Asia: a systems approach. 1997. FAO Farm Systems Management Series N13. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.

Italy. 169-188 (In English).

13. Jansson P.E., Karlberg L. Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. TRITA-AMI Report 30 87. Division of Land and Water Resources, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology. Stockholm. 2001. 321 (In English).

14. Rankinen K., Salo T., Granlund K., Rita H. Simulated nitrogen leaching, nitrogen mass field balances and their correlation on four farms in south-western Finland during the period 2000-2005. *Agric. Food Sci.* 2007. 16. 387-406 (In English).

15. Government regulation of environmental compensation. 2015. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150235>. Web address verified 08.02.2019 (In Finnish).

16. Oelofse M., Markussen B., Knudsen L., Schelde K., Olesen J.E., Jensen L., Bruun S. Do soil organic carbon levels affect potential yields and nitrogen use efficiency? An analysis of winter wheat and spring barley field trials. *Eur. J. Agron.* 2015. 66. 62-73 (In English).

17. Korsath A., Bakken L.R., Riley H. Nitrogen dynamics of grass as affected by N input regimes, soil texture and climate: lysimeter measurements and simulations. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 2003. 66: 181-199 (In English).

18. Sileika A.S., Gaigalis K., Kutra G., Smitiene A. Factors affecting N and P losses from small catchments (Lithuania). *Environ. Monit. Assess.* 2005. 102. 359-374 (In English).

19. Korsath A., Eltun R. Nitrogen mass balances in conventional, integrated and ecological cropping systems and the relationship between balance calculations and nitrogen runoff in an 8-year field experiment in Norway. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2000. 79. 199-214 (In English).

20. Addiscott T. M. Losses of Nitrogen from grassland, in: Addiscott T. M. (Ed.), Nitrate, Agriculture and the Environment. UK, Wallingford: CABI Publishing. 2005. 93-109 (In English).

21. Aronsson H., Liu J., Ekre E., Torstensson G., Salomon E. Effects of pig and dairy slurry application on N and P leaching from crop rotations with spring cereals and forage leys. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 2014. 98. 281-293 (In English).

22. Wallgren B., Lindén B. Effect of catch crops and ploughing times on soil mineral nitrogen. *Swedish J. Agric. Res.* 1994. 24. 67-75 (In English).

23. Virkajärvi P., Maljanen M., Saarijärvi K., Haapala J., Martikainen P.J. N₂O emissions from boreal grass and grass-clover pasture soils. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2010. 137. 59-67 (In English).

24. Wedin D.A., Russelle M.P. Nutrient cycling in forage production systems, in: Moore K.J., Barnes R.F., Nelson C.J., Collins M. (Eds.), Forages: The Science of Grassland Agriculture, vol. II. Blackwell Publ. Ames, IA, USA. 2007. 37-148 (In English).

25. Christensen B.T., Rasmussen J., Eriksen J., Hansen E.M. Soil carbon storage and yields of spring barley following grass leys of different age. *Eur. J. Agron.* 2009. 31. 29-35 (In English).

26. Turtola E., Jaakkola A. Viljelykasvin vaikutus ravinteiden huuhtoutumiseen savimaasta Jokioisten huuhtoutumiskentällä V. 1983-1986. Tiedote 22/87. MTT Agrifood Research Finland, Jokioinen. 1987 (In Finnish).

27. Eriksen J., Askegaard M., Søgaard K. Residual effect and nitrate leaching in grass-arable rotations: effect of grassland proportion, sward type and fertilizer history. *Soil Use Manage.* 2008. 24. 373-382 (In English).

28. Valkama E., Lemola R., Känkänen H., Turtola E. Meta-analysis of the effects of undersown catch crops on nitrogen leaching loss and grain yields in the Nordic countries. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2015. 203. 93-101 (In English).

29. Ryden J.C., Ball P.R., Garwood E.A. Nitrate leaching from grassland. *Nature.* 1984. 311. 50-53 (In English).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 28.03.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 28.03.2019

Статья принята к публикации 12.04.2019
The paper was accepted
for publication on 12.04.2019

Экологическая безопасность транспортно-технологических средств

Захид Адыгезалович Годжаев¹,
доктор технических наук, профессор, главный
научный сотрудник, e-mail: fic51@mail.ru;
Дмитрий Витальевич Аврамов²,
кандидат технических наук,
генеральный директор;

Николай Васильевич Мартынов²,
кандидат технических наук;
Борис Николаевич Белоусов³,
доктор технических наук, профессор;
Виктор Николаевич Добромиров⁴,
доктор технических наук

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

²НПФ «ЭлектроГидроДинамика», Санкт-Петербург, Российская Федерация;

³Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация;

⁴Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Реферат. Интенсификация производства, рост парка машин с двигателями внутреннего сгорания, а также увеличение эксплуатационной массы транспортно-технологических средств с каждым годом все больше обостряют экологическую ситуацию в мире. (*Цель исследования*) Выявить основные факторы воздействия транспортно-технологических средств на окружающую среду и проблемы, связанные с их утилизацией, а также с утилизацией автомобильных и тракторных шин. (*Материалы и методы*) Обобщили материалы, опубликованные в периодической печати, а также результаты испытаний транспортно-технологических средств – стендовых, полигонных и эксплуатационных. (*Результаты и обсуждение*) Выявили проблему разрушающего воздействия колесного движителя на опорную поверхность дороги, почвы и почвенный покров. Провели замеры под пятном контакта нескольких типов движителей. Определили величины напряженно-деформированного состояния почвы от воздействия этих движителей в виде распределения эпюр нормальных напряжений. Изучили влияние конструктивных особенностей транспортно-технологических средств при их криволинейном движении на размер колеи и разрушение почвы. Выделили характерные зоны следа. Заключили, что зимой уровень экологического загрязнения зависит от состояния дорожного покрытия и использования химических реагентов для борьбы с гололедом. Рассмотрели возможность использования электрогидравлической технологии при утилизации транспортно-технологических средств. Отметили необходимость формирования нормативно-правовых документов при создании, эксплуатации и утилизации транспортно-технологических средств с учетом зарубежного опыта по организации системы экологического управления, а также экологического аудита и маркировки, порядка оценки экологичности производственных систем и продукции на всех стадиях жизненного цикла. (*Выводы*) Представили основные факторы воздействия транспортно-технологических средства на окружающую среду в период жизненного цикла, вплоть до полной утилизации. Доказали необходимость безопасной и энергосберегающей электрогидравлической технологии утилизации электронных компонент и аккумуляторных батарей транспортно-технологических средств, базирующейся на избирательном разрушении пластиковых корпусов и выделении чистых благородных, редкоземельных и других металлов и их сплавов. **Ключевые слова:** экологическая безопасность, утилизация, автомобиль, почва, окружающая среда, почвенный покров, электрогидравлическая технология.

■ **Для цитирования:** Годжаев З.А., Аврамов Д.В., Мартынов Н.В., Белоусов Б.Н., Добромиров В.Н. Экологическая безопасность транспортно-технологических средств // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №2. С. 40-47. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-40-47.

Environmental Safety of Transport and Technological Vehicles

Zakhid A. Godzhaev¹,
Dr.Sc.(Eng.), Professor, Chief Research Engineer,
e-mail: fic51@mail.ru;
Dmitriy V. Avramov²,
Ph.D.(Eng.), General Director;

Nikolay V. Martynov²,
Ph.D.(Eng.);
Boris N. Belousov³,
Ph.D.(Eng.), Professor;
Viktor N. Dobromirov⁴,
Dr.Sc.(Eng.), Professor



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

²“ElektroGidroDinamika” Company, St. Petersburg, Russian Federation;

³N.E. Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;

⁴Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract. Intensified production, an increased fleet of vehicles with internal combustion engines, as well as increased operational mass of transport and technological vehicles continuously aggravate the environmental situation in the world every year. (*Research purpose*) To identify the main impacts made by the transport and technological vehicles on the environment and the problems associated with their disposal, as well as with the disposal of automobile and tractor tires. (*Materials and methods*) The authors have generalized the materials published in periodicals, as well as the results of bench, field and operational tests of the transport and technological vehicles. (*Results and discussion*) The authors have identified the problem of the destructive impact of the wheeled movers on the supporting road surface, the soil and the soil cover. Measurements have been taken under the contact area of several mover types and the values of the stress-strained state of the soil affected by these movers have been determined in the form of the distribution of normal stress diagrams. The authors have also studied the influence of the design features of transport and technological vehicles performing curvilinear motion on the track size and soil destruction and identified characteristic patterns of the track. Conclusion has been made that in winter the level of environmental pollution depends on the road surface condition and the use of chemical reagents for deicing. The authors have considered a possibility of using electrical-and-hydraulic technology for the disposal of transport and technological vehicles and stressed the need to form regulatory documents for the designing, operation and disposal of transport and technological vehicles, taking into account foreign experience in organizing the environmental management system, as well as environmental auditing and labeling, the procedure for assessing the environmental performance of production systems and products at all life cycle stages. (*Conclusions*) The paper presents the main impact factors of the transport and technological vehicles on the environment during their life cycle up to full disposal. The authors have proved the need for a safe and energy-saving electro-hydraulic technology for the disposal of electronic components and batteries of transport and technological vehicles based on selective destruction of plastic casings and the separation of pure noble, rare-earth and other metals and their alloys.

Keywords: ecological safety, disposal, automobile, soil, environment, soil cover, electrical-and-hydraulic technology.

■ For citation: Godzhaev Z.A., Avramov D.V., Martynov N.V., Belousov B.N., Dobromirov V.N. Ekologicheskaya bezopasnost' transportno-tekhnologicheskikh sredstv [Ecological safety of transport and technological vehicles]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N2. 40-47. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-2-40-47 (In Russian).

Интенсификация производства, рост парка машин с двигателями внутреннего сгорания, а также увеличение эксплуатационной массы транспортно-технологических средств (ТТС) с каждым годом все больше обостряют экологическую ситуацию в мире.

Цель исследования – выявить основные факторы воздействия ТТС на окружающую среду и проблемы, связанные с утилизацией ТТС, особенно автомобильных и тракторных шин, в соответствии с современными требованиями.

Материалы и методы. Использованы материалы, опубликованные в периодической печати, и результаты, полученные авторским коллективом. Применяемая методика состояла в обобщении, математической обработке результатов расчетных и экспериментальных исследований – стендовых, полигонных и эксплуатационных испытаний мобильных энергетических и транспортно-технологических средств, а также существующих нормативов и стандартов в предметной области.

Результаты и обсуждение. Основным результат

исследования – прогноз изменения структуры канцерогенных рисков массовой автомобилизации в долгосрочной перспективе.

Общая численность современного автопарка РФ достигает 49 млн ед., что составляет немногим более 6% мирового показателя. Это 5-е место в мире после США (252 млн ед.), Китая (109 млн ед.), Японии (76 млн ед.) и Германии (50 млн ед.) [1]. В долгосрочной перспективе к 2035 г. общая численность в нашей стране может достигнуть 180 млн ед.

В результате анализа научно-технических и нормативно-правовых материалов определены следующие аспекты данной проблемы.

Основные факторы воздействия ТТС на окружающую среду

К основным факторам негативного воздействия ТТС в системе «человек – ТТС – окружающая среда» чаще всего относят: выбросы отработанных газов (ОГ) двигателя и внутренний и внешний шум основных агрегатов автомобиля; значительно реже – разрушающее воздействие движителя на дорогу и грунт, утилизацию автомобилей и специаль-

ных жидкостей. Процессу утилизации выведенных из эксплуатации автомобилей в современной мировой практике также уделяется все возрастающее внимание. Связано это не только с обеспечением экологической чистоты утилизации, но и с глобальными проблемами ресурсосбережения при гигантских объемах промышленного производства. В России проблема обострена еще тем, что в 90-х годах прошлого века в нашу страну хлынул поток подержанных ТТС, иногда полностью выработавших свой ресурс. Поэтому в последние годы значительно увеличилось количество автомобилей, выводимых из эксплуатации. Например, для Москвы ежегодный показатель превышает 130 тыс. автомобилей.

ТТС становятся причиной практически всех глобальных экологических проблем, стоящих перед современным человечеством: загрязнения окружающей среды, парникового эффекта, деградации почв, накопления отходов, сокращения генофонда биосферы и прочего.

Выбросы отработанных газов двигателя

Ежегодно во всем мире автомобили выбрасывают в воздух более 4 млрд т двуокиси углерода (CO_2). К 2030 г. эта цифра может вырасти до 7 млрд т и привести к повышению средней температуры воздуха нашей планеты на 4°C по сравнению с доиндустриальным уровнем. Ежегодные транспортные выбросы в атмосферу России составляют около 35 млн т вредных веществ (58% этого количества приходится на ТТС). Отработанные газы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) содержат более 200 токсичных веществ.

Наиболее канцерогенны оксиды углерода, азота и серы, сажа, альдегиды, соединения свинца и других тяжелых металлов [1]. Выброс загрязняющих веществ с отработанными газами регламентируется нормами Правил 96 ЕЭК ООН.

Законодательные требования по выбросам вредных веществ определяют экологический класс автомобиля (например, Евро-2, Евро-3, Евро-4, Евро-5, Евро-6), который характеризует содержание вредных веществ в ОГ работающего автомобиля (рис. 1).

Новое исследование в университете Торонто показало, что тяжелые ТТС стали основным источником выбросов углекислого газа и особенно сажи и NO_x .

В Париже и пригородах уже установлен запрет на въезд для всех ТТС, поставленных на учет до 30 сентября 1997 г., а в центральную часть города запрещено въезжать автобусам и грузовикам, зарегистрированным до октября 2001 г.

Вопросы снижения выбросов в атмосферу вредных веществ и тепла, оптимизации расхода топлива достаточно освещаются в технической и научной литературе. Эти процессы связаны в первую

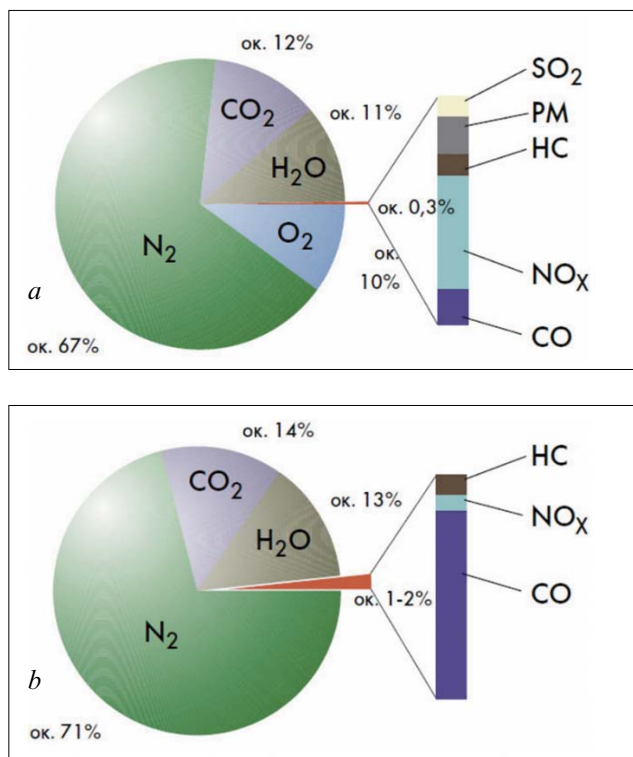


Рис. 1. Состав выхлопных газов:

a – бензиновых ДВС; b – дизельных ДВС

Fig. 1. The composition of exhaust gases:

a – gasoline engines; b – diesel engines

очередь с конструкцией ДВС, эффективность которой ограничена КПД цикла Карно. Только оснащение большегрузных автомобилей силовыми установками на газомоторном топливе позволит снизить содержание канцерогенов в отработанных газах: NO – примерно в 1,7 раза, CO – в 1,25 раза, углеводородов – в 1,4 раза, а также исключить наличие окислов серы и свинца.

Кроме показателей выбросов в атмосферу вредных веществ в составе отработанных газов важное значение имеют абсолютные показатели суммарных выбросов в окружающую среду всех видов канцерогенных веществ отдельным автомобилем и автомобильным парком страны за определенный период, например, за весь срок службы транспортного средства. Наличие таких данных позволяет оценить влияние автотранспорта на средний уровень загрязнения канцерогенами сельскохозяйственных, лесных, луговых угодий и водоемов, а также районов сосредоточенного нахождения населения. Этот вопрос сегодня относится к наименее изученным в функционировании системы «человек – автомобиль – среда», но попытки его решения предпринимались и ранее (табл. 1). Например, результаты оценки показателей для всего парка грузовых автомобилей и колесных сельхозмашин СССР по состоянию на 1987 г. подтверждают необходимость расширения исследований по внедрению в кон-

Таблица 1 ВРЕДНЫЕ ВЫБРОСЫ ПАРКА КОЛЕСНЫХ МАШИН В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В СССР (1984-1990 гг.) HARMFUL EMISSIONS OF WHEELED VEHICLES INTO THE ENVIRONMENT		
Параметры Parameters	Средний абсолютный показатель Absolute average	
	на одну колесную машину за весь срок службы, кг for one wheeled vehicle for the entire service life, kg	на весь парк колесных машин, млн т for the entire fleet of wheeled vehicles, million tons
Резина (шины) Rubber (tires)	734,35	1,150
Масло Oil	859,30	1,349
Антифриз Antifreeze	202,05	0,317
Свинец (АКБ) Lead (battery)	801,00	1,258
Фильтры Filters	244,75	0,334
Обломки, стекломой Debris, broken glass	1529,06	2,401
Асбест Asbestos	49,10	0,077
Свинец Lead	61,25	0,096
NO	6126,70	9,619
CO	24 508,80	38,479
Углеводороды Hydrocarbons	3675,80	5,770
Окислы серы Sulfur oxides	183,32	0,288

струкцию ТТС экологически дружелюбных материалов [1, 2].

Разрушающее воздействие на почву движителя ТТС

Проблема разрушающего воздействия движителя ТТС на почву и почвенный покров требует серьезного решения.

Так, после прохода трехосного ТТС суммарный след можно разделить на три зоны (рис. 2): I – зона однократного уплотнения колесом средней оси; II – зона трехкратного уплотнения колесами передней, средней и задней осей; III – зона двухкратного уплотнения колесами передней и задней осей.

При движении ТТС по грунтовым дорогам, пашне и почвам с растительным покровом при нерациональной работе системы «двигатель – трансмиссия – движитель» происходит существенное разрушение почвы и растительного покрова (рис. 2) [3].

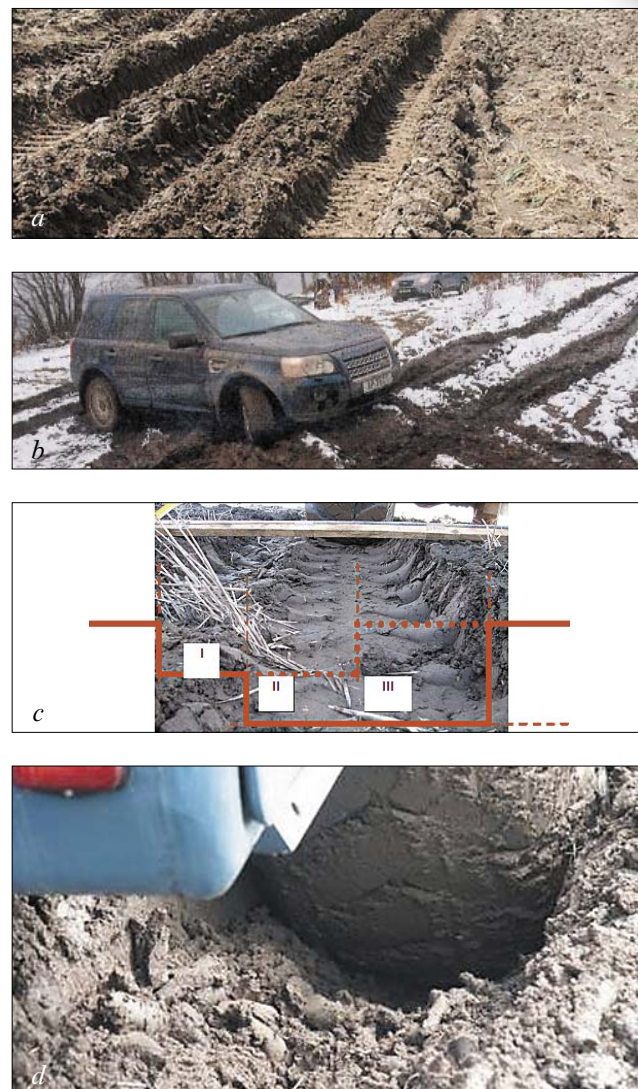


Рис. 2. Разрушение почвы после прохода колесного ТС:
а – прямолинейное движение; б – криволинейное движение;
с – глубина разрушения при несовпадении колес (I, II, III – зоны различного уплотнения почвы); d – срез грунта в результате интенсивного буксования колеса

Fig. 2. Soil destruction after the passage of a wheeled vehicle:
a – rectilinear motion; b – curvilinear motion; c – destruction depth when a track is mismatched (I, II, III – zones of various soil compaction); d – a soil cut as a result of intensive slipping of a wheel

Для оценки экологического ущерба, по мнению специалистов, следует исходить из размеров (глубины и ширины) колеи и степени уплотнения почвы.

Чтобы экспериментально оценить степень воздействия на почву различных движителей при постоянной вертикальной нагрузке, провели замеры под пятном контакта нескольких типов движителей (рис. 3).

Минимальная величина нормального напряжения соответствует полугусеничному движителю с резиноармированной гусеницей треугольного типа, где в эпюре напряжений (желтого цвета) отсутствуют ярко выраженные пики.

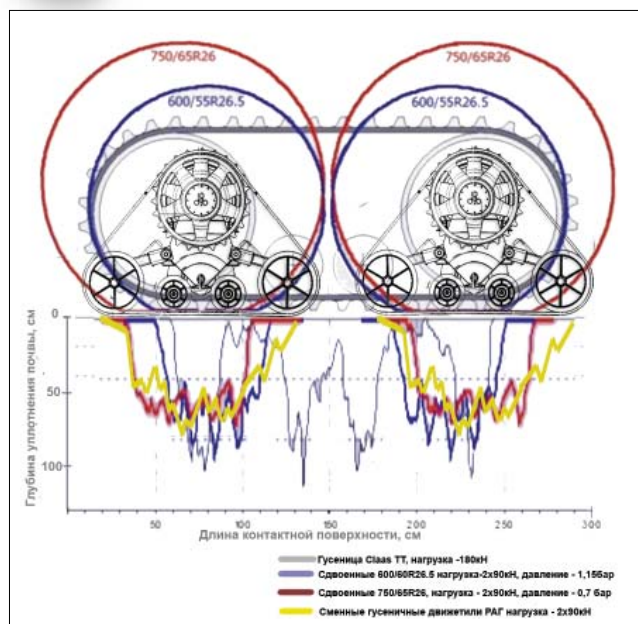


Рис. 3. Распределение эпюр нормальных напряжений в почве под различными видами движителей при одинаковой ширине следа:

1 – пневмоколесный движитель 750/65 R26; 2 – пневмоколесный движитель 600/55R26,5; 3 – гусеничный движитель; 4 – сменный полугусеничный движитель треугольного типа с резиноармированной гусеницей

Fig. 3. Distribution of normal stress plots in soil under different types of thrusters with the same track width

1 – pneumatic wheeled mover 750/65 R26; 2 – pneumatic wheeled mover 600/55R26,5; 3 – a track-laying propulsion; 4 – a replaceable half-track mover of a triangular type with a rubber-caterpillar track

Наихудший вариант демонстрирует колесо меньшего диаметра 600/55R26,5 (синяя эпюра).

Ярко выраженный пик эпюры нормальных напряжений от воздействия гусеничного движителя (под опорными катками) объясняется наличием резонансных колебаний грунтозацепа и гусеничного движителя с обводом.

Глубина проникновения уплотняющего воздействия от движителей ТТС может достигать 1 м и более.

Исследованиями установлено, что при криволинейном движении ТТС разрушают почву больше, чем при прямолинейном движении [1, 2, 4].

При криволинейном движении ТТС ширина колеи увеличивается в зависимости от радиуса поворота, возрастает суммарная площадь взаимодействия ТТС с опорной поверхностью. При этом движитель уплотняет и сдвигает грунт дополнительно в боковом направлении, увеличивая разрушающее воздействие (рис. 3, 4) [1-3, 5-7].

Можно выделить четыре характерные зоны следа с различным характером взаимодействия колесного движителя ТТС с деформируемым грунтом: I

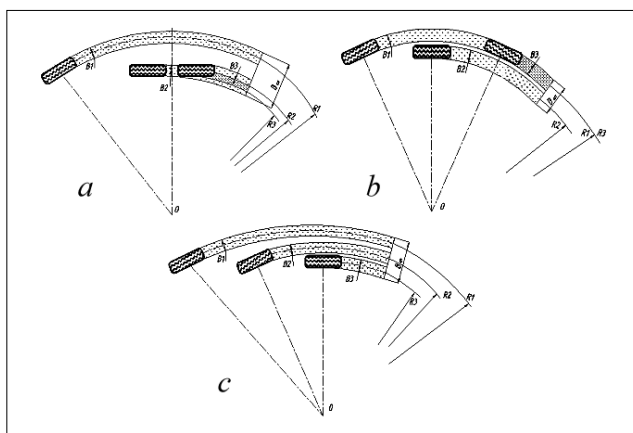


Рис. 4. Схема поворота трехосного ТС с различными схемами рулевого управления:

a – управляемые колеса на первой оси; b – управляемые колеса на передней и задней осях; c – управляемые колеса на передней и средней осях

Fig. 4. Rotation scheme of a 3-axis vehicle with different steering schemes:

a – with controlled front-axle wheels on the first axis; b – with controlled front- and rear-axle wheels; c – with controlled front- and middle-axle wheels

– зона однократного уплотнения грунта колесом передней оси; II – зона перекрытия следов (повторное уплотнение почвы колесом задней оси части колеи, оставшейся от колеса передней оси); III – зона однократного уплотнения грунта колесом задней оси; IV – зона бокового уширения и сдвига грунта (рис. 5).

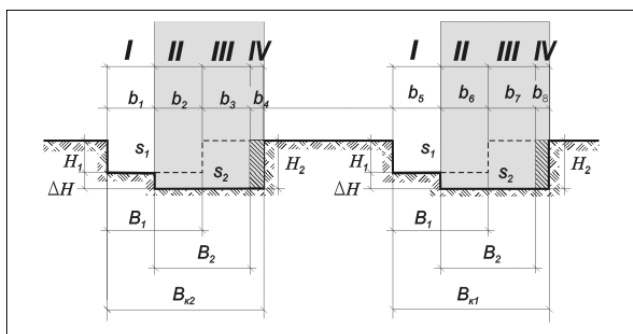


Рис. 5. Колея и зоны ее образования после прохода двухосного автомобиля

Fig. 5. Track and its formation areas after the passage of a two-axle vehicle

Устранение этих повреждений, особенно почвы и почвенного покрова в агроландшафтах, а также ландшафтах прибрежных зон природных и искусственных водоемов естественным путем требует от природы длительного времени или практически невозможно. Влияние конструктивных особенностей ТТС на разрушение почвы необходимо учитывать при проектировании транспортных средств для специализированных отраслей, например, ле-

соперерабатывающей промышленности, сельского хозяйства, для геологоразведочной деятельности, нефтегазодобывающей отрасли.

Оценить негативный вклад продуктов износа асфальтового дорожного покрытия, шин и автомобильных фрикционных материалов в общем объеме содержания твердых веществ в воздухе достаточно проблематично [1]. По данным зарубежных специалистов, из шин в процессе их износа выделяется больше некоторых канцерогенных веществ, чем из выхлопных газов двигателя. В частности, в составе общего объема вредных автомобильных выбросов вклад продуктов износа шин может достигать по твердым частицам 30%, а по *N*-нитро-заминам и бензапирену – 55% [4, 5]. Допустимые нормы содержания в дорожной пыли агрессивных продуктов износа автокомпонентов, как и химических реактивов, используемых в технологических процессах зимнего содержания дорог, оседающих на дорогах и смываемых дождевыми и талыми водами в придорожную почву и водоемы, отдельно не регламентированы.

Особенность воздействия колес ТТС на дорогу с твердым покрытием состоит в том, что их шины имеют развитые грунтозацепы с большим расстоянием между шашками и глубокими (20-30 мм) впадинами (рис. 6). Повышенное давление в контакте шашки с дорогой способствует разрушению дорожного полотна [4]. Кроме того, на краю шашки, особенно в области задней границы контакта, наблюдается интенсивное буксование грунтозацепов при работе на рыхлом грунте или почве [3].



Рис. 6. Разрушение дорожной поверхности профилем шины
Fig. 6. Destruction of the road surface by a tire section

Огромное влияние на разрушение дорожного полотна и почвы оказывает и тепловая нагруженность шин [1].

При движении по грунтовым дорогам проявля-

ется эффект галопирования (интенсивные продольно-угловые колебания), что отрицательно сказывается на физическом состоянии водителя ТТС.

После длительной эксплуатации грунтовые дороги приобретают синусоидальный профиль со средней высотой неровностей около 300 мм и длиной 3-5 м. Движение ТТС с приемлемыми скоростями по такой дороге оказывается невозможным из-за недопустимых ускорений на рабочем месте водителя – более 3g. Приходится ежегодно исправлять дорогу срезанием слоя грунта: около 38-40 м³ на 1 км дороги при ширине полотна 4 м.

На значительной части территории России наиболее сложным и ответственным в работе дорожно-эксплуатационных организаций остается зимний период. Уровень экологического загрязнения в это время во многом определяется состоянием дорожного покрытия и использованием химических реагентов для борьбы с гололедом.

Накопление химических реагентов в придорожной полосе происходит не в поверхностном слое почвы, а на глубине до 60 см, часто достигая грунтовых вод. Часть солей остается на покрытии и с брызгами от колес ТТС вместе с пылью и снегом переносится ветром на значительное расстояние. Таким образом, противогололедные реагенты попадают на придорожную растительность, а после таяния снега проникают в почву и с грунтовыми и талыми водами переносятся в водоемы, уничтожая их флору и фауну.

Опыт скандинавских стран в сфере зимнего содержания дорог демонстрирует возможность уменьшения объемов применения химических реагентов путем более широкого использования минеральных фрикционных материалов (крупнозернистого песка, мелкозернистого щебня и гранитной крошки размером не более 6-8 мм), а также в результате применения технологической операции «рыхление наката». Однако полного отказа от использования химических реагентов пока не предвидится.

Экологическая безопасность ТТС с учетом его полного жизненного цикла

Производство, эксплуатация и утилизация ТТС создают дополнительные экологические проблемы. Считается, например, что на создание и эксплуатацию парка ТТС, созданного к 2000 г., было затрачено (с учетом частичного возврата энергии при утилизации) около 3,31% суммарного энергопроизводства страны [1]. Известна оценка удельных энергозатрат на производство, эксплуатацию, ремонт и утилизацию ТТС. По ним можно построить энергетический баланс для прогнозируемого на ближайшие годы парка в количестве 1,57 млн условных ТТС грузоподъемностью 4,8 т при полной массе 10,42 т (табл. 2). Если условно считать, что весь автомобильный парк сформирован за предше-

Таблица 2

Table 2

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ БАЛАНС ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА
ДЛЯ ПРОГНОЗИРУЕМОГО ПАРКА ТТС**
ENERGY BALANCE OF LIFE CYCLE FOR THE FORECAST VEHICLE FLEET

Затраты Cost items	Удельные энергозатраты, кВт·ч/кг·км Specific energy consumption, kWh/kg·km	Абсолютные энергозатраты Absolute power inputs	
		на 1 км, тыс. кВт·ч 1 km, kWh per kg	на весь парк, млрд кВт·ч the whole Park, billion kWh
Изготовление Production	-18,12	-101,83	-159,80
Эксплуатация и ремонт Operation and repair	-142,47	-800,68	-1257,00
Утилизация (возврат энергии) Disposal (energy recovery)	+4,24	+23,83	+37,40
Баланс Balance	—	-878,68	-1379,40

ствующие 10 лет и за последующие 10 лет будет полностью списан, то можно сравнить общий энергобаланс его жизненного цикла с количеством энергии, произведенной в стране за эти 20 лет, например за период 1980-2000 гг. Учитывая произведенные за 1980-1990 гг. 17025 млрд кВт·ч и данные по добыче энергии за 2000 г., получим общий результат – 41675 млрд кВт·ч [2, 4]. Таким образом, на создание и эксплуатацию парка ТТС, сформированного к 2000 г., затрачено (с учетом частичного возврата энергии при утилизации) около 3,31% суммарного энергопроизводства страны.

При оценке энергозатрат рассматривают систему, в состав которой входят пять подсистем: получение конструкционных материалов; изготовление деталей, сборка узлов и машины в целом; ее эксплуатация; переработка (разборка, восстановление, рециклирование); утилизация (захоронение остатков)

За рубежом разработана серия стандартов ISO 14000, которые регламентируют организацию системы экологического управления, экологический аудит и маркировку, порядок оценки экологичности производственных систем и продукции на всех стадиях жизненного цикла. Требования этих стандартов в отношении переработки ТТС по окончании его эксплуатации дополняет директива ЕС 97/с337/02 «Транспортные средства, вышедшие из эксплуатации». Эти документы, во-первых, расширяют понятие «экологическая безопасность автомобиля» на весь его жизненный цикл, во-вторых, связывают его не только с традиционными показателями

(выбросом вредных веществ с отработанными газами, шумом), но и с потреблением природных ресурсов, энергии, воздействием на среду отслужившего автомобиля. Экологическую безопасность ТТС оценивают с учетом всех этапов жизненного цикла; уровень рециклируемых материалов в конструкции ТТС должен быть не ниже 90% по массе. В России и странах СНГ в 2011 г. утвержден технический регламент таможенного союза «О требованиях к колесным транспортным средствам по обеспечению их безопасной утилизации» (*Recycling safety requirements for road vehicles*).

Таким образом, даже с учетом предполагаемого почти четырехкратного увеличения численности автомобильного парка РФ к 2035 г. проблема загрязнения воздушной среды отработанными газами в значительной мере может быть решена, чего нельзя сказать об остальных экологических проблемах, создаваемых автомобильным транспортом, в частности о загрязнении атмосферы, почв и водоемов твердыми частицами продуктов износа автокомпонентов и дорожными химическими реагентами.

В такой ситуации для эффективной утилизации твердых отходов уже сегодня необходимо создание новых технологий для дробления резинотехнических изделий, триплекс-стеклобоя и отделения каркасных материалов. Если металлические компоненты (сталь, чугун, алюминий и т.п.) разбирают и используют как металлолом, то шины, стеклобой (особенно триплекс-стекло) образуют огромные свалки. Так, в США ежегодно выбрасывают около 300 млн шин, выбывших из эксплуатации, 3 млрд шин свалены в кучи около крупных городов. Это вызвано отсутствием экономичных и безопасных промышленных технологий для переработки шин и триплекс-стеклобоя. Необходимо создание новой, например, электрогидравлической технологии для дробления резинотехнических изделий, триплекс-стеклобоя и отделения каркасных материалов.

Разработали лабораторные установки для утилизации шин, стеклобоя и электронных компонентов автомобиля, а также технологии их применения для дробления резинотехнических изделий, триплекс-стеклобоя и отделения каркасных материалов. Работа подобной промышленной установки основана на электрогидравлическом эффекте, который позволяет оказывать избирательное воздействие на обрабатываемый материал, разрушая один (резину или стекло) и не затрагивая другой (каркасные изделия, в частности корд автомобильных шин). Разрушенный материал идет на вторичное использование. Электрогидравлическая технология утилизации электронных компонентов, базирующаяся на избирательном разрушении пластиковых корпусов, позволит выделить чистые благородные, редкоземельные и другие металлы и их сплавы.

Выводы. Обеспечение экологической безопасности использования автомобиля – это комплекс мер по совершенствованию конструкции автомобиля, приемов его использования, способов утилизации, методов и средств обеспечения безопасного содержания дорог, регламентирующих законодательных актов и целого ряда других факторов, затрагивающих взаимоотношения человека и окружающей среды. Успешное решение такой многоплановой проблемы возможно лишь на основе системного подхода.

Оценку экологической безопасности автомобиля следует проводить с учетом всех этапов его жизненного цикла, уровень рециклируемых материалов должен быть не ниже 90% по массе. Выброс загрязняющих веществ с отработанными газами – в соответствии с нормами Правил 96 ЕЭК ООН.

Прогнозы изменения численности парка автомобильных транспортных средств и внедрения инновационных решений в конструкцию автомобилей дают основание предполагать, что в долгосрочной перспективе основной акцент в обеспечении экологической безопасности автомобилей из области снижения токсичности отработанных газов переместится в сферу минимизации продуктов естественного износа автокомпонентов и их утилизации.

Первоочередными мероприятиями в решении задач утилизации должно стать создание новых технологий для дробления резинотехнических изделий, триплекс стеклобоя, отделения каркасных материалов, утилизации электронных приборов и аккумуляторных батарей, базирующихся на избирательном разрушении компонентов этих конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусов Б.Н., Шухман С.Б. Прикладная механика наземных тягово-транспортных средств с мехатронными системами. М.: Агроконсалт. 2013. 612 с.
2. Ксенович И.П., Скотников В.А., Ляско М.И. Ходовая система – почва – урожай. М.: Агропромиздат. 1985. 302 с.
3. Izmailov A., Revenko V., Godzhaev Z. The Method of Constructing the Diagrams of Shear Stresses in the Contact Zone of an Slipping Wheel With Soil. *SAE Technical Papers*. 2018. N1. 1335-1341.
4. 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.

5. Годжаев З.А., Русанов А.В., Ревенко В.Ю. Метод построения эпюр касательных напряжений в зоне контакта буксующего колеса с почвой // *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2017. N5. С. 39-47.
6. Izmailov A., Shevtsov V., Lavrov A., Godzhaev Z., Pryadkin V. Application of the Universal Tire Characteristic for Estimating the Maximum Pressure of a Pneumatic Tractor Wheel on the Ground. *SAE Technical Papers*. 2015. N1. 2760-2765.
7. Горин Г.С., Годжаев З.А., Головач В.М., Кузьмин В.А. Исследования поворачиваемости трактора для построения гибридной теории поворота // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2016. N5. С. 3-11.

REFERENCES

1. Belousov B.N., Shukhman S.B. Prikladnaya mekhanika nazemnykh tyagovo-transportnykh sredstv s mekhatronnymi sistemami [Applied mechanics of ground traction vehicles with mechatronic systems]. Moscow: Agrokonsalt. 2013. 612 (In Russian).
2. Ksenovich I.P., Skotnikov V.A., Lyasko M.I. Khodovaya sistema – pochva – urozhay [Running gear – soil – harvest]. Moscow: Agropromizdat. 1985. 302 (In Russian).
3. Izmaylov A., Revenko V., Godzhaev Z. The Method of Constructing the Diagrams of Shear Stresses in the Contact Zone of an Slipping Wheel With Soil. *SAE Technical Papers*. 2018. N1. 1335-1341 (In English).
4. Lobachevskiy Ya., 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).

5. Godzhayev Z.A., Rusanov A.V., Revenko V.Yu. Metod postroyeniya epyur kasatel'nykh napryazheniy v zone kontakta buksuyushchego koleasa s pochvoy [Method of plotting tangential stresses in the contact area of the slipping wheel with the soil]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2017. N5. 39-47 (In Russian).
6. Izmaylov A., Shevtsov V., Lavrov A., Godzhaev Z., Pryadkin V. Application of the Universal Tire Characteristic for Estimating the Maximum Pressure of a Pneumatic Tractor Wheel on the Ground. *SAE Technical Papers*. 2015. N1. 2760-2765 (In English).
7. Gorin G.S., Godzhayev Z.A., Golovach V.M., Kuz'min V.A. Issledovaniya povorachivayemosti traktora dlya postroyeniya gibridnoy teorii povorota [Studying the tractor turnability to construct the hybrid theory of rotation]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2016. N5. 3-11 (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 22.01.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 22.01.2019

Статья принята к публикации 10.04.2019
The paper was accepted
for publication on 10.04.2019

Разработка алгоритмов и программного обеспечения систем управления движением роботизированного почвообрабатывающего агрегата

Яков Петрович Лобачевский,
член-корреспондент Российской академии наук,
доктор технических наук,
главный научный сотрудник;
Сергей Эдуардович Лонин,
инженер, аспирант;
Илья Сергеевич Алексеев,
инженер, аспирант;

Николай Тимофеевич Гончаров,
специалист;
Ирина Ивановна Афонина,
старший научный сотрудник;
Екатерина Николаевна Ильченко,
инженер, e-mail: vim-avt@rambler.ru

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Российская Федерация

Реферат. Автоматизация сельскохозяйственной техники призвана решать конкретные практические задачи: контроль и поддержание качества выполнения технологического процесса, повышение производительности труда, увеличение урожайности сельскохозяйственных культур. Метод «точного земледелия» экономически целесообразен, так как способствует экономии технологического материала, снижению отрицательного воздействия на окружающую среду и производимую продукцию. (*Цель исследования*) Рассмотреть и проанализировать основные аспекты, необходимые при разработке алгоритмов и программного обеспечения систем управления движением роботизированного агрегата для пахотных работ. (*Материалы и методы*) Управление технологическим процессом включает руководство движением по заданной траектории, возможность изменения скорости движения в зависимости от загрузки двигателя, переключая передачу в трансмиссии. Физико-механические свойства агрегата существенно отличаются неоднородностью и зависят от погодных условий; алгоритм управления роботизированным мобильным агрегатом должен в максимальной степени учитывать вариации внешних воздействий сцепных свойств и сопротивлений движению в статусе случайных величин. (*Результаты и обсуждение*) Разработали имитационную модель, представляющую движение роботизированного агрегата. Выбрали циклическую траекторию перемещения агрегата, состоящую из двух видов участков: прямолинейных, на которых происходит обработка почвы, и участков разворота, где агрегат совершает разворот по криволинейной траектории вокруг некоторого центра. (*Выводы*) Внедрение роботизированных технологий в земледелие повышает технические, технологические, производственно-экономические показатели сельскохозяйственных агрегатов при проведении полевых работ, увеличивает производительность труда, сокращает сроки проведения работ, способствует рациональному использованию биоэнергетических ресурсов, повышает урожайность и снижает экологическую нагрузку на окружающую среду.

Ключевые слова: робот, роботизированная система, дистанционный контроль, программное обеспечение, автоматизация технологических процессов.

■ **Для цитирования:** Лобачевский Я.П., Лонин С.Э., Алексеев И.С., Гончаров Н.Т., Афонина И.И., Ильченко Е.Н. Разработка алгоритмов и программного обеспечения систем управления движением роботизированного почвообрабатывающего агрегата // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2019. Т. 13. №1. С. 48-52. DOI 10.22314/2073-7599-2018-13-1-48-52.

Development of Algorithms and Software Systems for Motion Control of a Robotic Tillage Unit

Yakov P. Lobachevsky,
corresponding member of the Russian Academy of
Sciences, Dr.Sc.(Eng.), chief researcher;
Sergey E. Lonin,
engineer, post-graduate student;
Ilya S. Alekseev,
engineer, post-graduate student;

Nikolay T. Goncharov,
specialist;
Irina I. Afonina,
senior researcher;
Ekaterina N. Il'chenko,
engineer

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russian Federation



Abstract. Automation of agricultural machinery is aimed at solving specific practical tasks: control and maintenance of the technological process quality, increasing labor productivity as well as crop yields. The method of "precision farming" is economically expedient, since it is a direct saving of technological material, as well as it helps reducing the negative impact on the environment and farm produce. (*Research purpose*) The research purpose is to review and analyze the main aspects required to develop the algorithms and software for motion control systems for a robotic tillage unit. (*Materials and methods*) To implement process control, it is necessary to control the direction of travel along a specified path, change the speed of movement depending on the engine load, switching the transmission gears. Physical-and-mechanical characteristics of the unit are rather heterogeneous and depend on weather conditions. Therefore, the algorithm for controlling the power of the robotic mobile unit must take into account, as much as possible, variations in the external effects of drawbar properties and the motion resistance, as a random factor. (*Results and discussion*) The authors have developed an imitation model representing the movement of a robotic unit. For the simulation, use has been made of a cyclic trajectory of the unit movement, consisting of two types of sections: the rectilinear ones reflecting the soil tillage pattern, and the turn areas where the unit makes a turn along a curvilinear trajectory around a certain center. (*Conclusions*) The implementation of robotic technologies in agricultural production result in increased technical, technological, production and economic indicators of agricultural units in field work, increased labor productivity, reduced time required for fieldworks, more rational use of bioenergy resources, increased yields of agricultural crops and reduced environmental impacts.

Keywords: robot, robotic system, remote control, software, automation of technological processes.

■ For citation: Lobachevskiy Ya.P., Lonin S.E., Alekseev I.S., Goncharov N.T., Afonina I.I., Il'chenko E.N. Razrabotka algoritmov i programmnoho obespecheniya sistem upravleniya dvizheniem robotizirovannogo agregata dlya pahotnykh rabot [Development of algorithms and software systems for motion control of a robotic tillage unit]. *Sel'skokhozyaystvennye mashiny i tekhnologii*. 2019. Vol. 13. N6. 48-52. DOI 10.22314/2073-7599-2019-13-1-48-52 (In Russian).

Работа энергетического средства роботизированного агрегата, как и трактора, происходит при тесном взаимодействии с почвой (грунтом). Его физико-механические свойства проявляются в виде сцепных свойств движителей и в виде сопротивлений действию рабочих агрегатов машины-орудия, которые отличаются большим разнообразием. Алгоритм управления энергетическим средством роботизированного мобильного агрегата должен в максимальной степени учитывать вариации внешних воздействий сцепных свойств и сопротивлений движению как случайные [1]. В состав управления энергетическим средством должны быть включены соответствующие датчики. При пассивных рабочих органах, например, при первичной обработке почвы, затраты энергии на движение во многом зависят от глубины обработки почвы и степени смещения рабочего органа в сторону не вспаханного поля. Эти параметры необходимо включить в алгоритм управления энергетическим средством.

Таким образом, алгоритм управления роботизированным агрегатом должен:

- определить по навигатору свое местоположение (ширину, долготу, высоту), сравнить его с заданной траекторией движения, в случае отклонения вычислить расхождение и подать сигнал на рулевое управление для устранения несоответствий;
- управлять подъемом-опусканием рабочих органов пахотного агрегата в соответствии с заданными координатами;
- регулировать глубину пахоты в соответствии

с заданной программой по сигналам датчика глубины;

- измерять и регулировать скорость движения в соответствии с технологической нормой;
- не допускать пробуксовки движителей;
- измерять и регулировать тяговую нагрузку на энергетическое средство изменением передаточного отношения от первичного вала к вторичному;
- регулировать положение плуга в горизонтальной плоскости изменением частоты вращения одного или двух опорных приводных колес по сигналам датчиков давления полевой доски на край борозды;
- записывать на флеш-память и передавать диспетчеру местоположение агрегата и параметры технологического процесса.

Цель исследования – рассмотреть и проанализировать основные аспекты, необходимые при разработке алгоритмов и программного обеспечения систем управления движением роботизированного агрегата для пахотных работ.

Материалы и методы. Принят за основу принцип приоритетности решения поставленных задач. Вначале решают задачу определения местоположения агрегата и соответствия его положения заданной траектории. Затем рассматривают задачу поддержания глубины вспашки, расхода топлива, скорости движения и т.д. [2]. Роботизированный агрегат – динамическая система, на которую действуют, с одной стороны, силы сопротивления движению, а с другой – движущая сила. Эти воздействия и вызывают изменения скорости агрегата:

$$\frac{d_v}{d_t} = \frac{P_K - \sum P_C}{m_{ar}} \quad (1)$$

где P_K – движущая сила агрегата;

$\sum P_C$ – сумма всех сил сопротивления;

m_{ar} – поступательно-движущая масса агрегата, приведенная к центру масс.

В случае разгона, торможения и изменения направления движения необходимо учитывать инерционность агрегата.

Уравнение для разгона и торможения агрегата имеет вид:

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{T_V}} + V_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_V}} \right), \quad (2)$$

$$\text{где } T_V = \frac{m_{ar}}{\frac{\partial \sum P_c}{\partial V} - \frac{\partial P_K}{\partial V}};$$

V_0 , $V_{уст}$ – соответственно начальная и установившаяся скорость агрегата;

T_V – постоянная времени, характеризующая запаздывание отклонения скорости агрегата относительно отклонения сил сопротивления движению и движущих сил (зависит от агрегата, сил сопротивления и тяговых показателей).

При установившемся движении агрегата на го-не необходимо измерять действительную и теоретическую скорости движения.

Действительную скорость движения выдает навигатор. Теоретическую скорость измеряют по датчикам, регистрирующим частоту вращения ведущих колес. Измеряют путь, пройденный колесами за единицу времени. Из-за пробуксовки теоретическая скорость оказывается больше действительной. Когда эта величина больше 10-15%, то в алгоритме управления движением предусматривается включение переднего ведущего моста (при его наличии) или снижение скорости движения; если скорости вращения правого и левого колеса отличаются при движении на прямолинейном участке, то включается дифференциал [3].

При развороте агрегата управление осуществляется согласно структурной схеме (рис. 1).

При подходе к концу борозды по команде рабочие органы поднимаются. Затем рычагом переключения переходят на первую (пониженную) передачу и отслеживают выбранную траекторию поворота в зависимости от длины плуга, рассчитанную и проверенную ранее до выхода на следующий гон. Сверяют координаты и опускают рабочие органы [4].

Для моделирования выбрали цикличную траекторию перемещения агрегата, состоящую из двух видов участков: прямолинейных, на которых происходит обработка почвы, и участков разворота, где агрегат совершает разворот по криволинейной

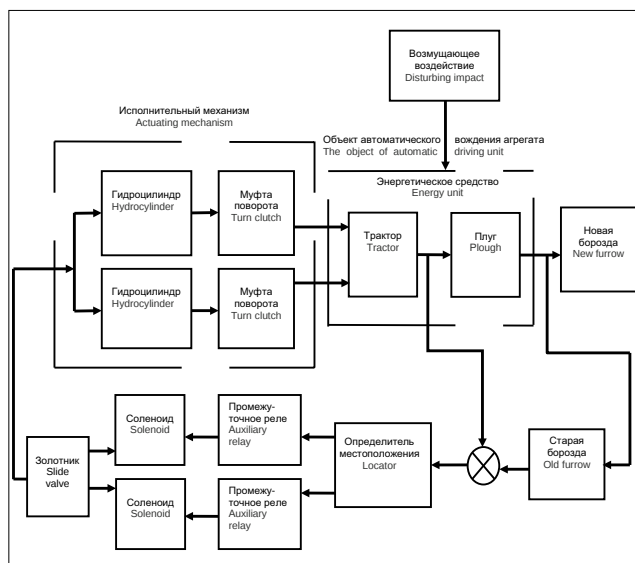


Рис.1. Структурная схема управления роботизированным агрегатом при разворотах

Fig. 1. Block diagram of the robotic unit controlling when making turns

траектории вокруг некоторого центра [5].

Траекторию и используемую площадь в создании подпрограммы рассчитывают по формулам: минимальный радиус поворота агрегата:

$$R_{\min} = L \operatorname{ctg} \alpha + B/2, \quad (3)$$

где L – продольная база трактора;

α – угол поворота управляемых колес;

B – расстояние между осями поворотных цапф колесного трактора.

Ширина поворотной полосы E_n и путь одного разворота S_x для петлевого поворота на 180° , соответственно, равны:

$$E_n = 2,8R + 0,5B_p; S_x = 6R + 2l.$$

Параметр l соответствует длине выезда агрегата до границы разворота и зависит от типа и конструкции орудий [6].

Для выполнения работ необходимо выбрать наиболее экономичный способ движения машинно-тракторного агрегата. Для этого используется оценочный показатель способа движения – коэффициент рабочих ходов $\varphi_{p.x}$, который определяется по формуле:

$$\varphi_{p.x} = \frac{\sum S_p}{\sum S_p + \sum S_x}, \quad (4)$$

где $\sum S_p$ – суммарная длина рабочих ходов, м; $\sum S_x$ – суммарная длина холостых ходов, м.

Суммарную длину рабочих ходов определяют по формуле:

$$\sum S_p = \frac{F}{B_{p.x}}, \quad (5)$$

где F – площадь обрабатываемого участка, м^2 ; $B_{p.x}$ – расстояние между рабочими ходами, м.

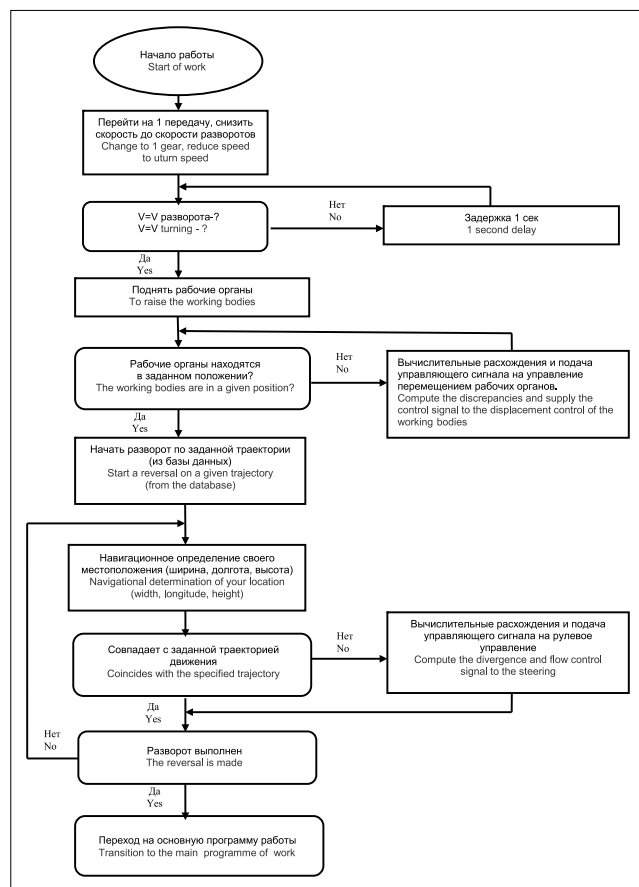


Рис. 2. Алгоритм управления роботизированным агрегатом при разворотах

Fig. 2. Control algorithm of the robotic unit when making turns

Суммарная длина холостых ходов определяется по следующей формуле:

$$\sum S_x = \sum S_{xi} \cdot n_i, \quad (6)$$

где $\sum S_{xi}$ – длина холостого хода при i -ом повороте, м; n_i – количество i -ых поворотов.

При движении агрегата челночным способом коэффициент рабочего хода $\varphi_{p.x}$ рассчитывают по формуле:

$$\varphi_{p.x} = \frac{L_r}{L_r + 6R + 2l}. \quad (7)$$

Коэффициент $\varphi_{p.x}$ существенно зависит от длины гона L_r и ширины загонов C , на которые разделяют поле. Поэтому каждой длине гона должна соответствовать определенная оптимальная ширина загона, обеспечивающая наибольшую производительность агрегата [7].

Оптимальная ширина загона для движения всвал или вразвал:

$$C_{\text{опт}} = \sqrt{2(L_r \cdot B_p + 8 \cdot R^2)} \quad (8)$$

где L_r – длина гона; R – наименьший радиус поворота; B_p – рабочая ширина захвата.

Результаты и обсуждение. Для обработки аналитических выкладок разработали подпрограмму, создающую имитационную модель движения роботизированного агрегата [8-10].

Программа показывает движение условной точки (агрегата) по траектории, состоящей из двух типов участков: прямолинейных, на которых происходит обработка почвы, и участков разворота, где агрегат совершает разворот по криволинейной траектории вокруг некоторого центра.

Во время разворота программа не ведет подсчет пройденного пути. Только когда агрегат встанет на начало следующей полосы движения, по команде оператора продолжается подсчет пройденного пути и выполнение программы по внесению удобрений. Общая длина гонов поля 100 м разбита на 10 участков длиной по 10 м на каждом гоне при ширине участка 7,2 метра.

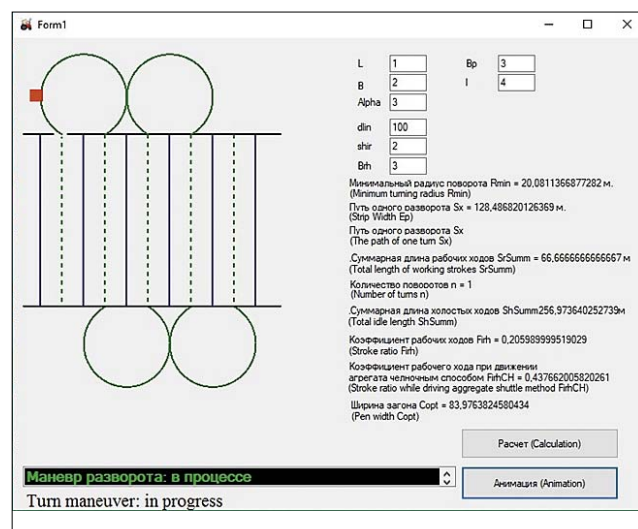


Рис. 3. Подпрограмма для создания имитационной модели движения роботизированного агрегата

Fig. 3. The subprogram to develop an imitating model of the robotic unit movement

Выводы. В настоящее время не существует какой-либо системы, надежно осуществляющей позиционирование и вождение сельскохозяйственного агрегата в различных условиях эксплуатации, что значительно усложняет программное обеспечение и снижает надежность и безопасность роботизированной технологии.

Мобильный роботизированный агрегат сельскохозяйственного назначения представляет собой автономное механизированное средство повышенной опасности. Поэтому требования к движению агрегата, самодиагностике энергетических, технологических и эксплуатационных параметров очень высокие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Измайллов А.Ю., Хорошенков В.К., Лужнова Е.С. Управление сельскохозяйственными мобильными агрегатами с использованием навигационной системы ГЛОНАСС/GPS // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N3. С. 15-20.
2. Сычев В.Г., Афанасьев Р.А., Годжаев З.А., Гришин А.П., Гришин А.А. Робототехника и агрохимическое обеспечение растениеводства // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. N9. С. 40-43.
3. Гончаров Н.Т., Измайллов А.Ю., Хорошенков В.К., Смирнов И.Г., Афонина И.И., Лужнова Е.С., Алексеев И.С., Лонин С.Э. Основные направления внедрения роботов в сельскохозяйственное производство России // *Автоматизация в промышленности*. 2017. N1. С. 38-40.
4. Измайллов А.Ю., Хорошенков В.К., Лужнова Е.С., Гончаров Н.Т., Афонина И.И., Алексеев И.С., Лонин С.Э. Автоматизированные системы управления для оптимизации работы МТА // *Сельский механизатор*. 2017. N7. С. 14-16.
5. Хорт Д.О., Филиппов Р.А., Кутырев А.И. Многофункциональное робототехническое средство с системой технического зрения // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2015. N4(14). С. 115-121.
6. Годжаев З.А., Гришин А.П., Гришин А.А., Гришин В.А. Ключевые технологии и прогноз развития сельскохозяйственной робототехники // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2016. N6(21). С. 35-41.
7. Артюшин А.А., Смирнов И.Г. Научно-техническое обеспечение применения ГЛОНАСС в сельскохозяйственном производстве // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. N1. С. 8-11.
8. Бейлис В.М. Общие технические и технологические требования к системе инновационных машинных технологий и техники // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. N5. С. 49-52.
9. Grimstad L., Phan H.N.T., Pham C.D., Bjugstad N., From P.J. Initial field-testing of Thorvald, a versatile robotic platform for agricultural applications. Proc of the IROS Workshop on Agri-Food Robotics. 2015. October.
10. Rieder R., Pavan W., Maciel J.M.C., Fernandes J.M.C., Pinho M.S. A virtual reality system to monitor and control diseases in strawberry with drones: A project. Proc 7th Int Cong on Environ Model & Software. 2014. June. 919-926.

REFERENCES

1. Izmaylov A.Yu., Khoroshenkov V.K., Luzhnova E.S. Upravlenie sel'skokhozyaystvennymi mobil'nymi agregatami s ispol'zovaniem navigatsionnoy sistemy GLONASS/GPS [Controlling agricultural mobile units with the GLONASS/GPS navigation system]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2015. N3. 15-20 (In Russian).
2. Sychev V.G., Afanashev R.A., Godzhaev Z.A., Grishin A.P., Grishin A.A. Robototekhnika i agrokhimicheskoe obespechenie rastenievodstva [Robotics and agrochemical support of crop production]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. N9. 40-43 (In Russian).
3. Goncharov N.T., Izmaylov A.Yu., Khoroshenkov V.K., Smirnov I.G., Afonina I.I., Luzhnova E.S., Alekseyev I.S., Lonin S.E. Osnovnye napravleniya vnedreniya robotov v sel'skokhozyaystvennoye proizvodstvo Rossii [Main directions of introducing robots into Russian agricultural production]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2017. N1. 38-40 (In Russian).
4. Izmaylov A.Yu., Khoroshenkov V.K., Luzhnova E.S., Goncharov N.T., Afonina I.I., Alekseyev I.S., Lonin S.E. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya dlya optimizatsii raboty MTA [Automated control systems to optimize operation of a machine-tractor unit]. *Sel'skiy mekhanizator*. 2017. N7. 14-16 (In Russian).
5. Khort D.O., Filippov R.A., Kutyrev A.I. Mnogofunktsional'noe robototekhnicheskoe sredstvo s sistemoy tekhnicheskogo zreniya [Multifunctional robotic tool with a technical vision system]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2015. N4(14). 115-121 (In Russian).
6. Godzhayev Z.A., Grishin A.P., Grishin A.A., Grishin V.A. Klyuchevyye tekhnologii i prognoz razvitiya sel'skokhozyaystvennoy robototekhniki [Key technologies and the forecast of agricultural robotics development]. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*. 2016. N6(21). 35-41 (In Russian).
7. Artyushin A.A., Smirnov I.G. Nauchno-tekhnicheskoe obespechenie primeneniya GLONASS v sel'skokhozyaystvennom proizvodstve [Scientific and technical support of the GLONASS use in agricultural production]. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2015. N1. 8-11 (In Russian).
8. Beylis V.M. Obshchie tekhnicheskyye i tekhnologicheskyye trebovaniya k sisteme innovatsionnykh mashinnykh tekhnologiy i tekhniki [General technical and technological requirements for the system of innovative engineering technology and machinery means]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. N5. 49-52 (In Russian).
9. Grimstad L., Phan H.N.T., Pham C.D., Bjugstad N., From P.J. Initial field-testing of Thorvald, a versatile robotic platform for agricultural applications. Proc of the IROS Workshop on Agri-Food Robotics. 2015. October (In English).
10. Rieder R., Pavan W., Maciel J.M.C., Fernandes J.M.C., Pinho M.S. A virtual reality system to monitor and control diseases in strawberry with drones: A project. Proc 7th Int Cong on Environ Model & Software. 2014. June. 919-926 (In English).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Статья поступила в редакцию 04.03.2019
The paper was submitted
to the Editorial Office on 04.03.2019

Статья принята к публикации 05.04.2019
The paper was accepted
for publication on 05.04.2019



ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Журнал «Сельскохозяйственные машины и технологии» входит в Перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ для публикации трудов соискателей ученых степеней кандидата и доктора наук.

Журнал включен в систему Российского индекса цитирования и в Международную информационную систему по сельскому хозяйству AGRIS. Электронные версии журнала размещаются на сайте Российской универсальной научной электронной библиотеки.

Статья, направляемая в журнал для публикации, должна соответствовать основной тематике журнала.

Статьи, поступившие в редакцию, проходят двойное слепое рецензирование. Отрицательная рецензия является основанием для отказа в публикации.

Редакция принимает рукописи и электронные версии статей, **набранные в Word шрифтом 14 пт. через 1,5 интервала, не более 12 страниц.**

Приведенные в статье формулы должны иметь пояснения и расшифровку всех входящих в них величин с указанием единиц измерения в СИ. Графические материалы должны быть приложены в виде отдельных файлов: фотографии – *jpg* или *tif* с разрешением *300 dpi*, графики, диаграммы – в *eps* или *ai*. Все графические материалы, рисунки и фотографии должны быть пронумерованы, подписаны и иметь ссылку в тексте.

Простые внутристрочные и однострочные формулы должны быть набраны символами в редакторе формул *Microsoft Word* без использования специальных редакторов. Не допускается набор: часть формулы символами, а часть в редакторе формул. **Если формулы заимствованы из других источников, то не следует приводить в них подробных выводов: авторы формул это уже сделали, повторять их не следует. Ссылки на обозначения формул обязательны. Статья должна содержать не более 10 формул, 3-4 иллюстрации, 3-4 таблицы, размер таблиц не более 1/2 страницы.**

В каждой статье должны быть указаны следующие данные:

- название статьи;
- фамилия, имя и отчество автора (ов);
- e-mail автора, контактный телефон;

- место работы автора(ов) (аббревиатуры не допускаются), почтовый адрес;
- ученая степень, ученое звание автора;
- реферат (объем 200-250 слов);
- ключевые слова;
- библиографический список.

Статью следует структурировать, обязательно указав следующие разделы:

- Введение (актуальность);
- Цель исследований;
- Материалы и методы;
- Результаты и обсуждение;
- Выводы.

Списки литературы (до 10 источников за последние 5 лет) следует оформлять по ГОСТ Р 7.05-2008.

Реферат

Реферат – это самостоятельный законченный материал. Вводная часть минимальна. Нужно коротко и емко отразить актуальность и цель исследований, условия и схемы экспериментов, привести полученные результаты (с обязательным аргументированием на основании цифрового материала), сформулировать выводы.

Объем реферата – 200-250 слов.

Нельзя использовать аббревиатуры и сложные элементы форматирования (например, верхние и нижние индексы).

На английский язык следует перевести:

- название статьи;
- место работы автора (ов);
- реферат и ключевые слова;
- библиографический список.

Машинный перевод недопустим!

Рукопись статьи должна быть подписана лично авторами. Автор несет юридическую и иную ответственность за содержание статьи.

Несоответствие статьи хотя бы одному из перечисленных условий может служить основанием для отказа в публикации.

ПОДПИСКА 2019

**КАК
подписаться
на журнал?**



ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

Подписку на второе полугодие 2019 г. можно оформить
до 20 июня включительно
в почтовых отделениях связи
по каталогу агентства «РОСПЕЧАТЬ»
Подписной индекс **35825**

ЖУРНАЛ

**«СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫЕ МАШИНЫ И ТЕХНОЛОГИИ»
ВКЛЮЧЕН В ПЕРЕЧЕНЬ ВАК**

Редакция журнала:

Тел.: 8 (499) 174-88-11, 8 (499) 174-89-01

www.vimsmit.com

e-mail: smit@vim.ru