

четы больших парков машин с учетом их индивидуальной наработки.

2. Работы по выполнению технического обслуживания тракторов целесообразно выполнять постоянными кадрами со звеньевой организацией труда, работающих или на стационарных постах или частично в поле с использованием передвижных средств технических обслуживаний.

#### Библиографический список

1. Завора В.А. Основы эксплуатации мобильных сельскохозяйственных агрегатов. – Барнаул, 2004. – 256 с.

2. Плаксин А.М. Энергетика мобильных агрегатов в растениеводстве. – Челябинск, 2005. – 203 с.

3. Завора В.А., Белокурено С.А. Основы машиноиспользования растениеводства. – Барнаул, 2012. – 186 с.

4. Ресурсосбережение при технической эксплуатации сельскохозяйственной техники / В.И. Черноиванов, А.Э. Северный, М.А. Халфин и др. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2001. – 420 с.

5. Справочник инженера-механика сельскохозяйственного производства: учеб. пособие. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. – Ч. II. – 368 с.

6. Техническая эксплуатация машин в фермерских хозяйствах / И.Г. Голубев, А.Э. Северный, И.А. Спицын и др. – М.: Информагротех, 1997. – 292 с.

7. Диагностика и техническое обслуживание машин: учебник для студентов высших учебных заведений / А.Д. Ананьин,

В.М. Михлин, И.И. Габитов и др. – М.: Изд-кий центр «Академия», 2008. – 432 с.

8. Машинно-технологическая станция / В.И. Черноиванов, Н.В. Краснощекоев, А.Э. Северный. – М.: ГОСНИТИ, 2009. – 402 с.

#### References

1. Zavora V.A. Osnovy ekspluatatsii mobil'nykh sel'skokhozyaystvennykh agregatov. – Barnaul, 2004. – 256 s.

2. Plaksin A.M. Energetika mobil'nykh agregatov v rastenievodstve. – Chelyabinsk, 2005. – 203 s.

3. Zavora V.A. Belokurenko S.A. Osnovy mashinoispol'zovaniya rastenievodstva. – Barnaul, 2012. – 186 s.

4. Resursosberezhenie pri tekhnicheskoi ekspluatatsii sel'skokhozyaystvennoi tekhniki / V.I. Chernoiivanov, A.E. Severnyi, M.A. Khalfin i dr. – M.: FGNU «Rosinformagrotekh», 2001. – 420 s.

5. Spravochnik inzhenera-mekhanika sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva: ucheb. posobie. – M.: FGNU «Rosinformagrotekh», 2003. – Ch. II. – 368 s.

6. Tekhnicheskaya ekspluatatsiya mashin v fermerskikh khozyaystvakh / I.G. Golubev, A.E. Severnyi, I.A. Spitsyn i dr. – M.: Informagrotekh, 1997. – 292 s.

7. Diagnostika i tekhnicheskoe obsluzhivanie mashin: uchebnik dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedenii / A.D. Anan'in, V.M. Mikhlina, I.I. Gabitov i dr. – M.: Izd-skii tsentr «Akademiya», 2008. – 432 s.

8. Mashinno-tekhnologicheskaya stantsiya / V.I. Chernoiivanov, N.V. Krasnoshechekov, A.E. Severnyi. – M.: GOSNITI, 2009. – 402 s.



УДК 621.3:536.7:678

**М.В. Халин, Е.И. Востриков**  
M.V. Khalin, Ye.I. Vostrikov

### МНОГОЭЛЕКТРОДНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ ЭЛЕКТРООБОГРЕВАТЕЛЬ ДЛЯ АГРЕССИВНЫХ И ВЛАЖНЫХ СРЕД

#### MULTI-ELECTRODE COMPOSITE ELECTRIC HEATER FOR AGGRESSIVE AND DAMP ENVIRONMENT

**Ключевые слова:** энергоэффективность, поверхностно-распределенный электрообогрев, тепловая проводимость, многоэлектродный композиционный электрообогреватель, влажные и агрессивные среды.

**Keywords:** energy efficiency, surface-distributed electrical heating, thermal conductivity, multi-electrode composite electric heater (MECEH), damp and aggressive environment.

Сформулированы требования для энергоэффективного функционирования поверхностно-распределенного электрообогревателя при его эксплуатации в агрессивных и влажных средах. Выявлены основные недостатки известных средств локального обогрева на предприятиях АПК. Определены задачи и цель исследований для обеспечения энергоэффективного продолжительного функционирования многоэлектродного композиционного электрообогревателя МКЭ. Выполнен тепловой расчет электрообогревателя с учетом температуры окружающей среды. Получено уравнение теплового баланса композиционного электрообогревателя с учетом различных способов теплопереноса, связывающее тепловые, электрические и геометрические параметры МКЭ. Разработанная конструкция системы локального поверхностно-распределенного электрообогрева имеет широкие функциональные возможности, обеспечивает высокую надежность и электробезопасность при работе во влажных и агрессивных средах при наличии механических воздействий. В предлагаемом МКЭ изоляционные, электропроводящий слой и электропроводящая заземляющая пластина изготавливаются на основе бутилкаучука, а в качестве электропроводящей фазы используют технический углерод. Разработанная конструкция МКЭ может быть использована для местного обогрева в технических и бытовых условиях, например, в животноводстве (молодняк птицы, КРС и свиней), растениеводстве (подогрев грунта), ЖКХ (предотвращение обра-

зования наледей водостоков, карнизов, подходов к зданиям и сооружениям).

The requirements for power efficient operation of surface-distributed electric heater when operating in aggressive and damp environment were formulated. The main disadvantages of the existing local heating devices used in farming facilities were identified. The research goal and objectives to enable energy-efficient and long-lasting operation of a multi-electrode composite electric heater (MECEH) were determined. Thermal calculation of the electric heater taking into consideration the ambient temperature was performed. The heat balance equation for composite electric heater was determined taking into consideration different methods of heat transfer correlating the thermal, electrical and geometric parameters of MECEH. The developed design of a local surface-distributed electric heating system features a wide range of functional capabilities, enables high reliability and electrical safety when operating in damp and aggressive environment and mechanical impact. In the proposed MECEH all insulating and electricity-conductive layers, electricity-conductive ground plate are made of butyl-rubber based material and technical carbon is used as an electricity-conductive phase. The developed MECEH design may be applied for local heating of utility and accommodation space, e.g. in animal farming (young poultry, cattle, pigs), crop farming (ground heating), housing and public utilities (to prevent ice built up in roof drainage and access roads).

**Халин Михаил Васильевич**, д.т.н., проф., каф. «Электротехника и автоматизированный электропривод», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. E-mail: temf@yandex.ru.

**Востриков Евгений Иванович**, аспирант, каф. «Электротехника и автоматизированный электропривод», Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. E-mail: temf@yandex.ru.

**Khalin Mikhail Vasilyevich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Chair of Electrical Engineering and Automatic Electric Drive, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. E-mail: temf@yandex.ru.

**Vostrikov Yevgeniy Ivanovich**, Post-Graduate Student, Chair of Electrical Engineering and Automatic Electric Drive, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov. E-mail: temf@yandex.ru.

### Введение

Широкое использование энергоэффективных систем поверхностно-распределенного обогрева в особо опасных, агрессивных и влажных средах предъявляет ряд специальных требований к конструкции первичного преобразователя электрической энергии в тепловую. К ним можно отнести высокую степень электрической изоляции, стойкость к механическим повреждениям, влагохлесткость изоляционного слоя, термостойкость при значительных перепадах температур окружающей среды.

Общим недостатком известных композиционных и других электрообогревателей является то, что в результате нарушения условий эксплуатации и транспортировки происходит механическое повреждение изоляционного слоя и возникает вынос потенциала на поверхность изоляционного слоя, что приводит к поражению электрическим током биологического объекта.

Для энергоэффективного продолжительного функционирования поверхностно-распределенного многоэлектродного композиционного электрообогревателя (МКЭ) необходимо решение следующих задач: наиболее точное определение требуемой удельной мощности обогрева при заданном диапазоне температур окружающей среды; высокие показатели сопротивления изоляции при эксплуатации в агрессивной и влажной среде; надежность к механическим повреждениям изоляционного покрытия.

**Целью** данного исследования является разработка энергоэффективного поверхностно-распределенного электрообогревателя, обеспечивающего надежную эксплуатацию систем локального электрообогрева в условиях агрессивных и влажных сред, в т.ч. на объектах АПК.

**Расчет и проектирование МКЭ.** Для успешного решения поставленных цели и за-

дач необходимо определение теплофизических параметров МКЭ, связанных с его геометрическими размерами, по уравнению теплового баланса системы обогрева. Рассмотрим расчетную модель системы обогрева, когда электрообогреватель МКЭ расположен на поверхности пола сельскохозяйственного объекта (рис. 1).

Теплоотдача пола в воздух определяется по [1, 2]:

$$Q_n = \alpha_{пв} \cdot F_n (t_n - t_{oc}) \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{пв}$  – коэффициент теплоотдачи поверхности обогреваемого пола в воздух Вт/м<sup>2</sup>·°С;

$F_n$  – площадь обогреваемых участков пола, м<sup>2</sup>;

$t_n$  – температура поверхности пола, °С;

$t_{oc}$  – температура воздуха окружающей среды, °С;

$$t_n - t_{oc} = \Delta t;$$

$$\alpha_{пв} = \alpha_k + \alpha_n,$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи пола конвекцией;

$\alpha_n$  – коэффициент теплоотдачи излучением.

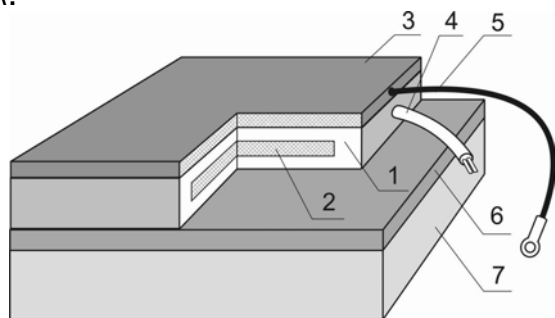


Рис. 1. Система

локального поверхностно-распределенного электрообогрева с использованием МКЭ:

1 – изоляционный слой;

2 – электропроводящий слой;

3 – электропроводящий заземляющий слой;

4 – токоподводы; 5 – заземляющий провод;

6 – покрытие (деревянное, бетонное,

плиточное); 7 – основание пола

Для горизонтальной поверхности, обращенной вверх:

$$\alpha_k = 2,15 \sqrt[4]{\Delta t};$$

$$\alpha_n = B \cdot C,$$

где B – температурный фактор:

$$B = \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot \frac{1}{\Delta t}$$

где  $T_1$  – абсолютная температура нагретой поверхности, К;

$T_2$  – абсолютная температура воздуха внутри помещения, К;

C – коэффициент лучеиспускания – определяется как произведение коэффициента черноты  $\varepsilon$  и коэффициента лучеиспускания  $C_0$  для абсолютно черного тела, равного 4,9 [2]:

$$C = \varepsilon \cdot C_0.$$

Степень черноты  $\varepsilon$  зависит от материала, качества обработки его поверхности и температуры тела. Коэффициент  $\varepsilon$  для строительных материалов определяется из справочных данных [2].

В практических расчетах для резинотехнических изделий принимаем  $\varepsilon = 0,92$ , следовательно:

$$C = 0,92 \cdot 4,9 = 4,5.$$

В условиях установившегося теплоперехода температура электронагревательного композиционного элемента и пола с течением времени не меняется. Вследствие этого тепло, которое отдает электрообогреватель в сторону пола, переходит не изменяя своего количества, т.е.

$$q = \frac{t_3 - t_n}{R_n} \text{ и } q = \frac{t_n - t_{oc}}{R_n}, \quad (2)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$t_3$  – температура композиционного электрообогревателя, °С;

$R_n$  – полное термическое сопротивление конструкции пола, м<sup>2</sup>·°С/Вт:

$$R_n = \frac{1}{\alpha_n};$$

$R_{пв}$  – полное термическое сопротивление теплоотдачи поверхности пола в воздух:

$$R_{пв} = \frac{1}{\alpha_{пв}}.$$

Приравняв правые части уравнений (2), определим необходимую температуру композиционного электрообогревателя:

$$t_3 = t_n + \alpha_{пв} R_n (t_n - t_{oc}). \quad (3)$$

Для дальнейшего определения полного количества тепла, выделяемого МКЭ, найдем теплоотдачу обогреваемого пола в основании конструкции.

Удельный тепловой поток в сторону слоев конструкции, лежащих ниже композиционных электрообогревателей, равен:

$$q_{низ} = \frac{t_3 - t_{ocн}}{R_{низ}}, \quad (4)$$

где  $t_{ocн}$  – температура основания пола;

$R_{низ}$  – сопротивление теплоотдаче слоев конструкции, лежащих ниже МКЭ:

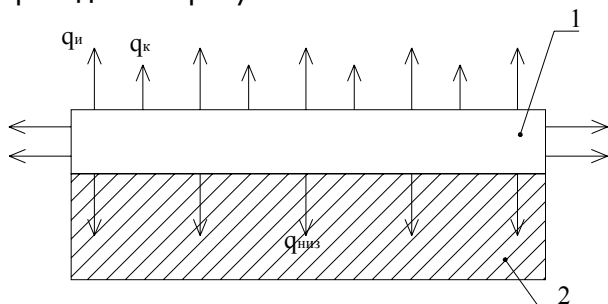
$$R_{низ} = \frac{1}{\sum \alpha_{низ}}, \quad (5)$$

где  $\sum \alpha_{низ}$  – сумма коэффициентов теплоотдачи слоев конструкции основания пола, Вт/м<sup>2</sup>·°С.

Теплоотдача в основании конструкции пола:

$$Q_{осн} = q_{низ} \cdot F_{п} \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

Структурная схема удельных тепловых потоков композиционного электрообогревателя приведена на рисунке 2.



**Рис. 2. Схема удельных тепловых потоков:**  
1 – электрообогреватель МКЭ;  
2 – основание конструкции пола

Общую теплоотдачу обогреваемого пола Q с учетом формул (1), (2) и (4) найдем следующим образом:

$$Q = \left[ \delta_{пв} (t_{п} - t_{ос}) + \frac{t_{э} - t_{осн}}{R_{низ}} \right] \cdot F_{п} \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

Многэлектродные композиционные электрообогреватели (МКЭ) представляют собой сложную систему, преобразующую в соответствии с электро-, теплофизическими параметрами МКЭ электрическую энергию в тепловую и обеспечивающую заданную температуру на поверхности электрообогревателя.

Уравнение теплового баланса композиционного электрообогревателя с учетом формулы (7) может быть представлено в следующем виде [3, 4]:

$$Q = \left[ \delta_{пв} (t_{п} - t_{ос}) + \frac{t_{э} - t_{осн}}{R_{низ}} \right] \cdot F_{п} = P = U^2 K_э \Gamma, \quad (8)$$

где P – активная мощность МКЭ, Вт;

K<sub>э</sub> – коэффициент электропроводности МКЭ, имеющий размерность длины, при этом K<sub>э</sub> = G<sub>э</sub> / γ;

где γ – удельная электрическая проводимость композиционного материала, См/м;

G<sub>э</sub> – электрическая проводимость МКЭ, См.

С учетом требований эксплуатации системы локального поверхностно-распределенного обогрева в агрессивных и влажных средах при наличии механических воздействий предлагаемая конструкция включает МКЭ, содержащий размещенный внутри изоляционного слоя 1 электропроводящий слой 2, с которым связаны электроды, подключенные к кабелю 4 (рис. 1) [5]. К верхней поверхности изоляционного слоя 1 привулканизирован дополнительный слой в виде элект-

тропроводящей пластины 3, выполненной из бутилкаучука с наполнением техническим углеродом. Электропроводящая пластина 3 выполнена толщиной, равной толщине электропроводящего слоя 2. Между электропроводящей пластиной 3 и изоляционным слоем 1 завулканизирован заземляющий провод 5.

Многэлектродный композиционный электрообогреватель работает следующим образом. В исходном положении многэлектродный композиционный электрообогреватель устанавливают в рабочей зоне на нижнюю плоскость изоляционного слоя 1. Привулканизированная к изоляционному слою 1 электропроводящая пластина 3 располагается на верхней плоскости композиционного электрообогревателя и имеет непосредственный контакт с биологическим объектом.

Посредством заземляющего провода 5, закрепленного на электропроводящей пластине 3, осуществляется надежное заземление многэлектродного композиционного электрообогревателя, так как вся поверхность электропроводящей пластины 3 является заземляющим элементом. Температура нагрева поверхности изоляционного слоя 1 определяется составом компонентов электропроводящего слоя 2 при изготовлении электрообогревателя.

В предлагаемом многэлектродном композиционном электрообогревателе изоляционные слои 1, электропроводящий слой 2 и электропроводящая заземляющая пластина 3 изготавливаются на основе бутилкаучука БК-1675, а в качестве электропроводящей фазы используют технический углерод марок N-330 или N-245.

Выполненные исследования по ГОСТ 9.030-74 показателей физико-механической прочности (ФМП), характеризующих старение резин в агрессивной среде, значит, и условий эксплуатации изоляционного слоя МКЭ, подтвердили их соответствие установленным требованиям [6-8].

### Результаты исследований

Полученные аналитические зависимости позволяют составить уравнение теплового баланса системы обогрева на основе МКЭ с учетом различных способов теплопереноса, а также определить удельную электрическую проводимость проектируемого электрообогревателя.

Разработанная конструкция системы локального поверхностно-распределенного электрообогрева имеет широкие функциональные возможности, обеспечивает высокую надежность и электробезопасность при работе во влажных и агрессивных средах.

Предлагаемый электрообогреватель удобен в эксплуатации, исключает влияние механических воздействий, за счет наличия допол-

нительного слоя в виде электропроводящей пластины из бутилкаучука.

### Закключение

В результате выполненных исследований разработана система локального поверхностно-распределенного обогрева в агрессивных и влажных средах при наличии механических воздействий. Предлагаемая конструкция включает МКЭ и может быть использована для местного обогрева в технических и бытовых условиях, например, в животноводстве (молодняка птицы, КРС и свиней), растениеводстве (подогрев грунта); ЖКХ (предотвращение образования наледей водостоков, карнизов, подходов к зданиям и сооружениям).

### Библиографический список

1. Евстигнеев В.В., Пугачев Г.А., Халина Т.М., Халин М.В. Расчет и проектирование низкотемпературных композиционных электрообогревателей / СО РАН. – Новосибирск: Наука, 2001. – 168 с.
2. Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физические модели. – Новосибирск: Наука; Сибирское отделение, 1986 – 296 с.
3. Марсов В.Ю. Технологии и технические средства на основе композиционных электрообогревателей в животноводстве: дис. ... канд. техн. наук. – Барнаул, 2006. – 137 с.
4. Халина Т.М., Халин М.В., Дорош А.Б., Строков М.Н., Востриков Е.И., Зыбцев М.Ю. Разработка проектно-конструкторской документации для создания устройств и установок на основе многоэлектродных композиционных электрообогревателей: отчет о НИОКР // ЭнергоЭффектТехнология – № Г.Р. 02200953368, ГК № 5922р/6815. – Барнаул, 2009. – 178 с.
5. Пат. на пол. мод. 127566 РФ, МПК Н 05В 3/28. Многоэлектродный композиционный электрообогреватель / М.В. Халин, Т.М. Халина, М.Ю. Зыбцев, В.В. Беспалов. – № 2011130098/07; заявл. 19.07.2011; опубл. 27.04.2013. Бюл. № 12.
6. Khalin M.V., Khalina T.M., Vostrikov E.I., Dorosh A.B., Korotkikh V.M. Power Efficient Composite Electrical Heaters for Moist and Hostile Environments // Technical and Physical Problems in Power Engineering (ICTPE – 2012): The Eighth Intern. Conf. – Fredrikstad, Norway, 2012. – P. 328-332.
7. Халин, М.В., Востриков Е.И. Энергоэффективные композиционные электрообогреватели антиобледенительных систем

// Известия ТПУ. – 2012. – Т. 320. – № 4. – С. 52-57.

8. ГОСТ 9.030-74. Резина. Методы испытания на стойкость в ненапряженном состоянии к воздействию жидких агрессивных сред.

### References

1. Evstigneev V.V., Pugachev G.A., Khalina T.M., Khalin M.V. Raschet i proektirovanie nizkotemperaturnykh kompozitsionnykh elektroobogrevatelei / SO RAN. – Novosibirsk: Nauka, 2001. – 168 s.
2. Kutateladze S.S. Analiz podobiya i fizicheskie modeli. – Novosibirsk: Nauka, Sibirskoe otделение, 1986. – 296 s.
3. Marsov V.Yu. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva na osnove kompozitsionnykh elektroobogrevatelei v zhivotnovodstve: dis. ... kand. tekhn. nauk. – Barnaul, 2006. – 137 s.
4. Khalina T.M., Khalin M.V., Dorosh A.B., Strokov M.N., Vostrikov E.I., Zybtev M.Yu. Razrabotka proektno-konstruktorskoj dokumentatsii dlya sozdaniya ustroystv i ustanovok na osnove mnogoelektroodnykh kompozitsionnykh elektroobogrevatelei: otchet o NIOKR // EnergoEffektTekhnologiya. – № G.R. 02200953368, GK № 5922r/6815. – Barnaul, 2009. – 178 s.
5. Pat. na pol. mod. 127566 RF, MPK N 05V 3/28. Mnogoelektroodnyi kompozitsionnyi elektroobogrevatel' / M.V. Khalin, T.M. Khalina, M.Yu. Zybtev, V.V. Bespalov. – № 2011130098/07; zayavl. 19.07.2011; opubl. 27.04.2013. Byul. № 12.
6. M.V. Khalin, Power Efficient Composite Electrical Heaters for Moist and Hostile Environments / M.V. Khalin, T.M. Khalina, E.I. Vostrikov A.B. Dorosh, V.M. Korotkikh // Technical and Physical Problems in Power Engineering (ICTPE - 2012): The Eighth Intern. Conf. – Fredrikstad, Norway, 2012. – P. 328-332.
7. Khalin M.V., Vostrikov E.I. Energoeffektivnye kompozitsionnye elektroobogrevateli antiobledenitel'nykh sistem // Izvestiya TPU. – 2012. – Т. 320. – № 4. – S. 52-57.
8. GOST 9.030-74. Rezina. Metody ispytaniya na stoikost' v nenapryazhennom sostoyanii k vozdeistviyu zhidkikh agressivnykh sred.

*Исследование выполнено в соответствии с Государственными контрактами с Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере по программе «СТАРТ-2006» ГК № 4414р/6815, ГК № 5922р/6815.*

