

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ АГРЕГАТА ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОРМОВ

А.М. Шувалов¹, Ю.Н. Демин¹, В.Н. Расстригин²

*Всероссийский научно-исследовательский и
проектно-технологический институт по использованию техники и
нефтепродуктов в сельском хозяйстве (ВИИТиН), Тамбов (1);
Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации
сельского хозяйства (ВИЭСХ), Москва (2)*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: время нагрева; коэффициент перегрузки; поверхность отклика; плотность тока; потребляемая мощность; удельное сопротивление воды; электроды.

Аннотация: Дано математическое описание процесса нагрева воды в агрегате для термической обработки кормов. Приведены полиномиальные зависимости энергетических показателей работы агрегата. Описаны параметры режимов агрегата, при которых обеспечивается минимум коэффициента перегрузки и времени нагрева с условием ограничения максимальной потребляемой мощности.

Обозначения

a – постоянный коэффициент, кг/(мг·Ом·м);	β – коэффициент, учитывающий влияние парообразования на плотность тока на электродах;
c_m – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К);	η – КПД агрегата;
F – площадь поверхности стенок варочной емкости, м ² ;	$\rho_{\text{вод}}$ – плотность воды, кг/м ³ ;
$h_{\text{эл}}$ – высота активной поверхности электродной группы, м;	ρ_1, m_1 – удельное электрическое сопротивление и масса воды одного типа;
k – коэффициент теплопередачи через стенки варочной емкости, Вт/(м ² ·К);	ρ_2, m_2 – удельное электрическое сопротивление и масса воды другого типа;
$k_{\text{эт}}$ – геометрический коэффициент электродной группы;	ρ_{293} – удельное электрическое сопротивление воды при 293 К, Ом·м;
$Q_{\text{п}}$ – потери энергии в окружающую среду, Вт;	ρ'_{20} – необходимое удельное электрическое сопротивление воды, Ом·м;
t – время нагрева воды в парогенераторе, ч;	ρ'_{20} – фактическое удельное электрическое сопротивление воды, Ом·м;
T_1 – начальная температура воды, К;	τ – постоянная времени нагрева воды в парогенераторе;
T_2 – конечная температура воды, К;	$\tau_{\text{нагр}}$ – продолжительность одного цикла нагрева, ч.
ΔT – перепад температур между паром и содержимым варочной емкости, К;	
$U_{\text{ф}}$ – фазное напряжение сети, В;	
V – объем воды, заливаемой в парогенератор, м ³ ;	

По данным Тамбовского областного комитета госстатистики за 1999 год доля личных подсобных хозяйств в общем объеме производства мяса составила 83, молока - 59, яиц - 37 % (в 1998 году было соответственно 80, 57 и 38 %) [1].

Основной проблемой функционирования таких хозяйств является скудное обеспечение малогабаритными средствами автоматизации и механизации технологических процессов, особенно в сфере животноводства.

Нами разработан малогабаритный, компактный агрегат для термической обработки кормов, у которого в одном корпусе находится источник тепловой энергии и ее потребитель.

Агрегат состоит из корпуса, снизу которого расположена электродная камера с электродами, варочной емкости на 100 литров с крышкой и паровой рубашкой, полость которой соединена с полостью электродной камеры. Паровая рубашка имеет теплоизоляцию и защитный кожух. Полость электродной камеры с помощью трубки в нижней точке соединена с компенсационной емкостью, которая сообщается с атмосферой (рис. 1).

Принцип работы агрегата основан на изменении количества воды в полости электродной камеры пропорционально тепловому напору через стенки варочной емкости. При этом изменяется активная поверхность электродов, и, соответственно, паропроизводительность. Главной отличительной особенностью агрегата для термической обработки кормов является то, что регулирование мощности нагрева осуществляется без применения традиционной пускорегулирующей аппаратуры.

Основными показателями, характеризующими эффективность применения агрегата для термической обработки кормов, являются время продолжения технологического процесса тепловой обработки, потребление электроэнергии и уровень перегрузки парогенератора по отношению к средней мощности. Причем эти показатели взаимосвязаны: чем меньше мощность источника тепла, тем больше время приготовления корма, теплотери через ограждающие конструкции и, соответственно, возрастает потребление электроэнергии.

Одной из отличительных особенностей функционирования любой тепловой электродной установки является зависимость потребляемого тока (мощности) от температуры воды, заполняющей электродную группу. Причем с ростом температуры потребляемый ток (мощность) также возрастают, а после закипания воды плотность тока стабилизируется. Закипание воды в электродной камере происходит за относительно короткий промежуток времени (1-3 мин), но характеризуется резким увеличением потребляемой мощности (в 1,5-2,5 раза) по сравнению со средними значениями за цикл работы. Математическое описание данного процесса имеет следующий вид [2]:

$$P = \frac{3 \cdot U_{\Phi}^2 \cdot h_{\text{эл}}}{40 \cdot \rho_{293} \cdot \beta \cdot k_{\text{эГ}}} \cdot e^{t/\tau} \cdot (T_1 - 253);$$

$$\tau = \frac{40 \cdot \rho_{293} \cdot k_{\text{эГ}} \cdot c_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{вод}} \cdot V}{3 \cdot U_{\Phi}^2 \cdot h_{\text{эл}} \cdot \eta_{\text{Г}}};$$

$$t = \tau \cdot \ln \frac{T_1 - 253}{T_1 - T_1}.$$

После стабилизации плотности тока на электродах парогенератора изменение мощности происходит согласно соотношению:

$$P = \frac{k \cdot F \cdot \Delta T}{\eta}, \text{ Вт.} \quad (2)$$

Среднюю мощность за один цикл нагрева можно определить по формуле:

$$P_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{пот}}}{\tau_{\text{нагр}}}, \text{ Вт.} \quad (3)$$

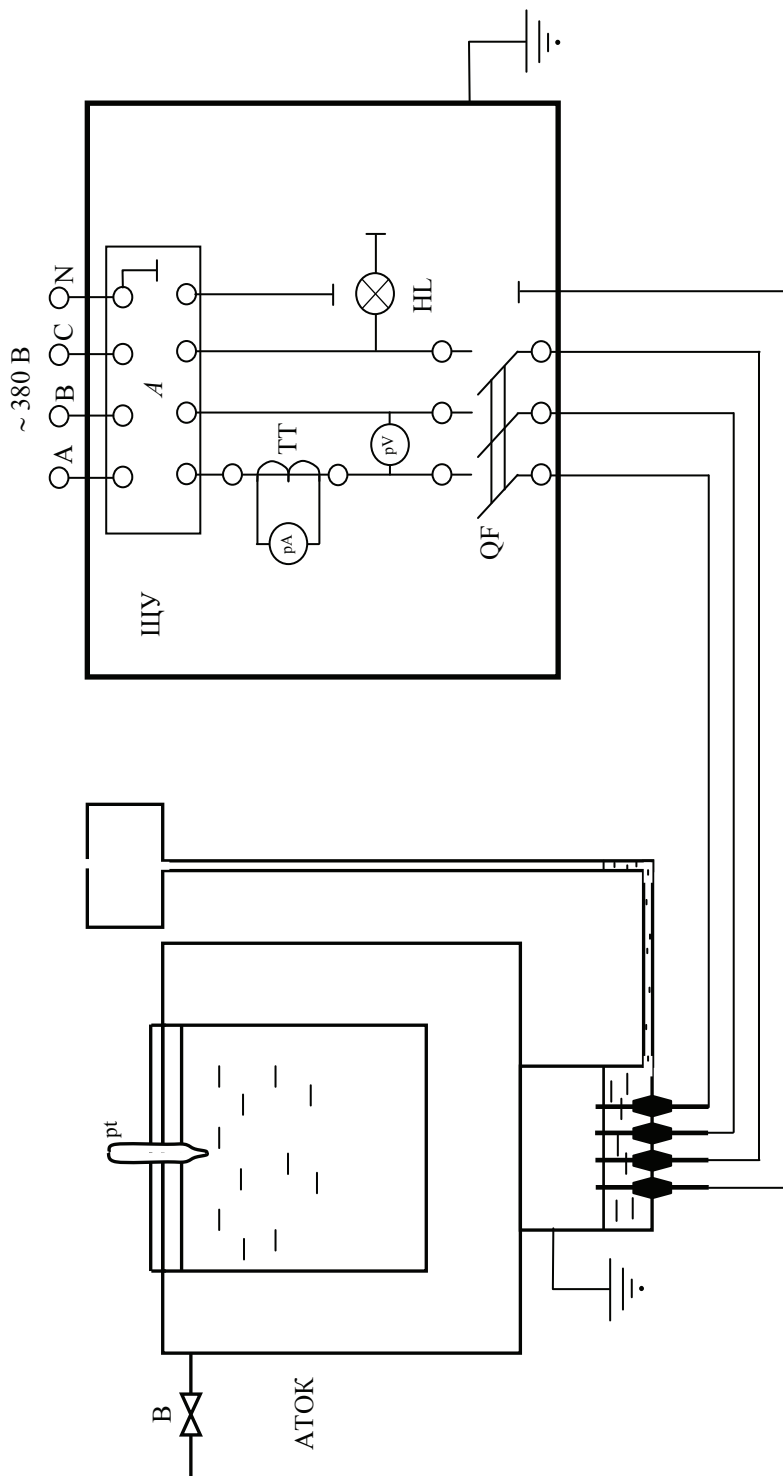


Рис. 1 Агрегат для термической обработки кормов и схема его подключения:

А – счетчик СА4-Н678; АТОК – агрегат для термической обработки кормов; Я – ядро вращающееся; ЯЦУ – ядро управления; ЯQF – ядро выключателя автоматического ЯЕ-Т05у; ЯНЦ – ядро автоматическая; ЯТТ – ядро трансформатора; Яр – ядро реле; ЯрА – ядро амперметр; ЯрВ – ядро вольтметр

Анализ кривых, приведенных на рис. 2, показывает, что при различных режимах работы меняются время нагрева и пиковое значение потребляемой мощности. Примем коэффициент перегрузки как отношение максимального тока (мощности) к среднему значению за цикл приготовления корма:

$$k_{\text{пер}} = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{ср}}} = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{ср}}} \quad (4)$$

Очевидно, что наиболее благоприятным для эксплуатации электрических сетей и пускорегулирующей аппаратуры будет режим работы агрегата, при котором $P_{\text{max}} \rightarrow P_{\text{ср}}$ или $k_{\text{пер}} \rightarrow 1$. Однако при этом увеличивается время нагрева. Нами была поставлена задача найти компромиссное решение, то есть определить режимы работы агрегата, при которых обеспечивается совместный минимум коэффициента перегрузки $k_{\text{пер}}$ и времени нагрева $\tau_{\text{нагр}}$.

Технология термической обработки кормов в агрегате предусматривает выполнение следующих операций: нагрев до кипения воды, засыпка корма и доведение его до готовности. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что наиболее продолжительной и энергоемкой операцией является нагрев до кипения воды. Поэтому представляется целесообразным провести комплексную оптимизацию вышеуказанных показателей работы агрегата для термической обработки кормов применительно к нагреву воды.

Для определения функциональных зависимостей был проведен многофакторный эксперимент, в котором переменными принимались следующие факторы: удельное электрическое сопротивление воды $\rho_{\text{в}}$; высота подвеса компенсационной емкости $h_{\text{емк}}$; количество воды, заливаемой в парогенератор $V_{\text{пг}}$.

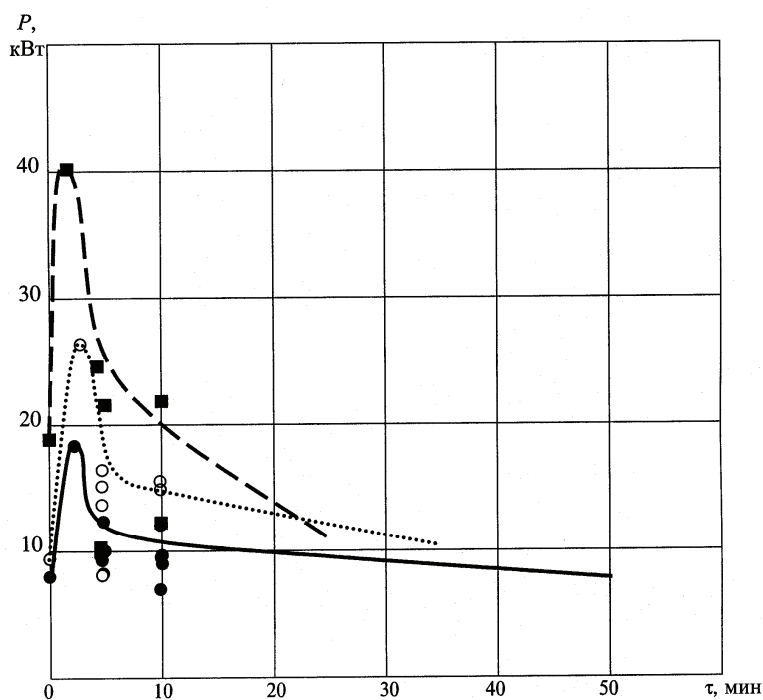


Рис. 2 Изменение потребляемой мощности при различных режимах работы аппарата:

- $V_{\text{пг}} = 5,0$ л, $\rho_{\text{в}} = 15$ Ом·м, $h_{\text{емк}} = 2,0$ м;
- ⋯ $V_{\text{пг}} = 7,5$ л, $\rho_{\text{в}} = 15$ Ом·м, $h_{\text{емк}} = 2,5$ м;
- - - $V_{\text{пг}} = 10,0$ л, $\rho_{\text{в}} = 15$ Ом·м, $h_{\text{емк}} = 3,0$ м

Изменение удельного электрического сопротивления воды производилось путем добавления дистиллированной воды или кальцинированной соды. При этом использовались следующие соотношения [3]:

– удельное электрическое сопротивление смеси двух типов воды $\rho_{см}$, Ом·м:

$$\rho_{см} = \frac{m_1 + m_2}{m_1/\rho_1 + m_2/\rho_2}; \quad (5)$$

– количество вещества, добавляемого в раствор с известным удельным электрическим сопротивлением ΔS , мг/кг:

$$\Delta S = \frac{1}{a} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{т0}} - \frac{1}{\rho_{т0}} \right). \quad (6)$$

Для получения моделей процесса в виде полиномов второй степени был выбран некомпозиционный план второго порядка на кубе типа Бокса-Бенкина [4]. Для обеспечения равномерности внесения элемента случайности влияния неуправляемых и неконтролируемых факторов на отклик была использована рандомизация проведения опытов [5].

В результате статистической обработки опытных данных были найдены полиномиальные зависимости показателей работы агрегата от вышеуказанных факторов:

– коэффициент перегрузки

$$\begin{aligned} k_{пер} = & 1,89 + 0,011т5 \cdot V_{пг} + 0,66у75 \cdot \rho_в + 0,00т5 \cdot h_{смк} + \\ & + 0,09 \cdot V_{пг} \cdot \rho_в + 0,00т5 \cdot V_{пг} \cdot h_{смк} + 0,0575 \cdot \rho_в \cdot h_{смк} - \\ & - 0,181т5 \cdot V_{пг}^T + 1,1т875 \cdot \rho_в^T + 0,101т5 \cdot h_{смк}^T; \end{aligned} \quad (7)$$

– время нагрева

$$\begin{aligned} \tau_{нагр} = & 40 - 7,9175 \cdot V_{пг} - у,541т5 \cdot \rho_в - у,54у75 \cdot h_{смк} + \\ & + 1,т475 \cdot V_{пг} \cdot \rho_в + т,9175 \cdot V_{пг} \cdot h_{смк} + 0,8у5 \cdot \rho_в \cdot h_{смк} - \\ & - 1,6675 \cdot V_{пг}^T + 1у,75 \cdot \rho_в^T - 1,т5 \cdot h_{смк}^T. \end{aligned} \quad (8)$$

Оценка значимости коэффициентов модели проводилась с использованием критерия Стьюдента. В случае отсеивания коэффициентов при квадратичных членах значения остальных уточнялись по методу наименьших квадратов. Таким образом, окончательно уравнения регрессии принимают следующий вид:

– коэффициент перегрузки

$$k_{пер} = 1,95у08 + 0,011т5 \cdot V_{пг} + 0,66у75 \cdot \rho_в - 0,18788 \cdot V_{пг}^T + 0,1тт1т \cdot \rho_в^T; \quad (9)$$

– время нагрева

$$\tau_{нагр} = у8,уут86 - 7,9175 \cdot V_{пг} - у,541т55 \cdot \rho_в - у,54у75 \cdot h_{смк} + 1у,958у9 \cdot \rho_в^T. \quad (10)$$

Адекватность полученных моделей проверялась по критерию Фишера.

Для построения контурных кривых поверхностей откликов уравнения регрессии (9) и (10) приводились к каноническому виду при фиксированных значениях высоты подвеса компенсационной емкости $h_{смк} = 0, -1$ и 1 (в кодированном виде).

Параметры оптимальных режимов определялись как точки пересечения совмещенных поверхностей откликов коэффициента перегрузки и времени нагрева (рис 3, 4 и 5). Режиму работы аппарата, удовлетворяющему ограничению максимальной потребляемой мощности 10 кВт, соответствуют следующие значения факторов оптимизации: $\rho_в = 16,25$ Ом·м, $V_{пг} = 6,1$ л при высоте подвеса компенсационной емкости $h_{смк} = 2$ м и $h_{смк} = 2,5$ м.

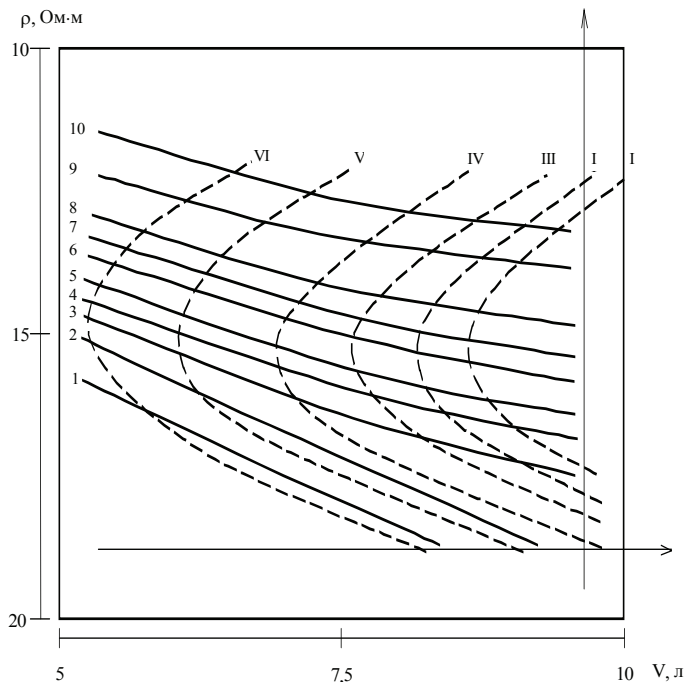


Рис. 3 Двумерные сечения поверхности откликов $k_{пер}$ и $\tau_{нагр}$ при $h_{емк} = 2,5$ м:
 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 – коэффициент перегрузки соответственно
 1,86; 1,96; 2,06; 2,16; 2,26; 2,46; 2,66; 2,86; 3,26; 3,66
 I, II, III, IV, V, VI – время нагрева соответственно 35, 37, 39, 41, 43, 45 мин

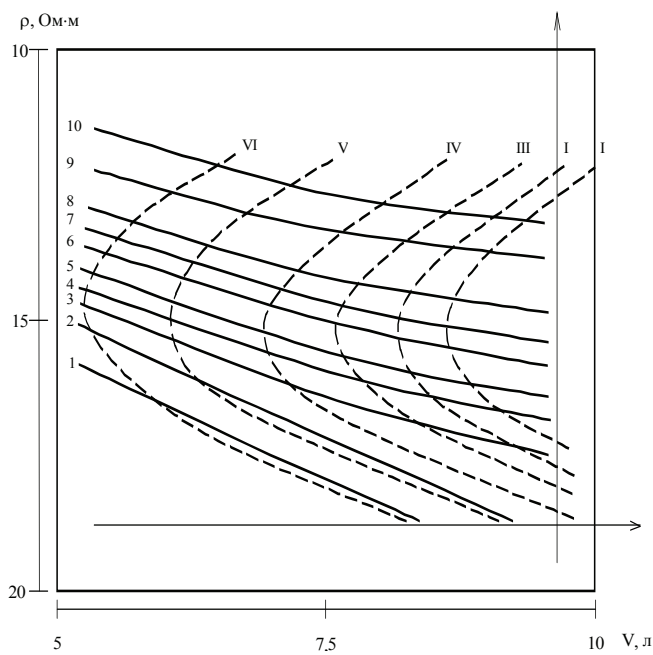


Рис. 4 Двумерные сечения поверхности откликов $k_{пер}$ и $\tau_{нагр}$ при $h_{емк} = 2,0$ м
 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 – коэффициент перегрузки соответственно
 1,86; 1,96; 2,06; 2,16; 2,26; 2,46; 2,66; 2,86; 3,26; 3,66
 I, II, III, IV, V, VI – время нагрева соответственно 38, 40, 42, 44, 46, 48 мин

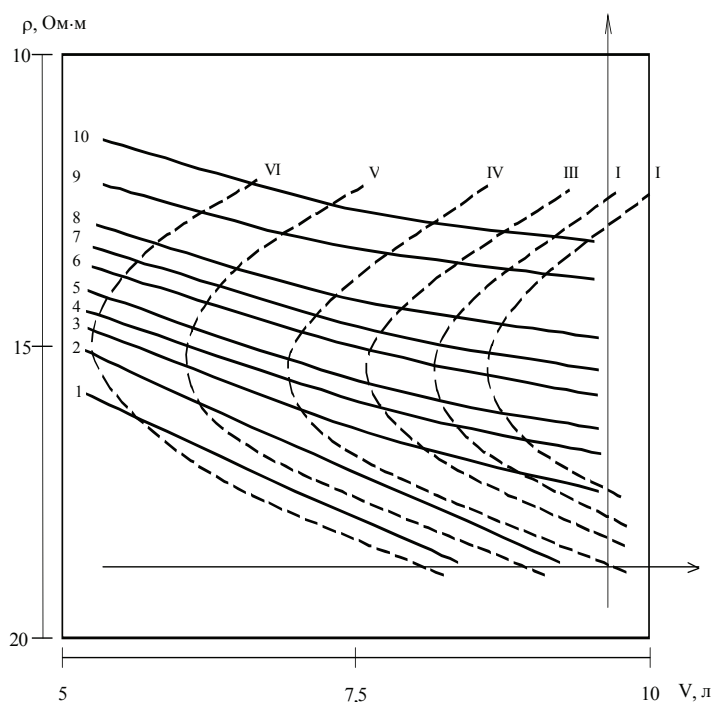


Рис. 5 Двумерные сечения поверхности откликов $k_{пер}$ и $\tau_{нагр}$ при $h_{емк} = 3,0$ м:
 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 – коэффициент перегрузки соответственно
 1,86; 1,96; 2,06; 2,16; 2,26; 2,46; 2,66; 2,86; 3,26; 3,66
 I, II, III, IV, V, VI – время нагрева соответственно 31, 33, 35, 37, 39, 41 мин

Общие выводы

1. Полученные математические модели (9) и (10) позволяют определить коэффициент перегрузки и время нагрева при различных режимах работы агрегата для термической обработки кормов.

2. Используя совмещенные поверхности откликов (рис. 3, 4 и 5) можно определить параметры режимов работы агрегата, при которых обеспечивается минимум коэффициента перегрузки и времени нагрева.

Список литературы

1. Тамбовская область: год 1999-й (по материалам областного комитета госстатистики) // Тамбовская жизнь от 9.02.2000 года.
2. Электротехнология // А.М. Басов, В.Г. Быков, А.В. Лаптев, В.Б. Файн. – М.: Агропромиздат, 1985. – 265 с.
3. Электротермическое оборудование для сельскохозяйственного производства // Н.Б. Каган, В.Г. Кауфман, М.Г. Пронько, Г.Д. Яневский. – М.: Энергия, 1980. – 192 с.
4. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 263 с.
5. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.

Energy Work Indexes of Apparatus for Thermal Feed Processing

A.M. Shuvalov¹, Yu.N. Demin¹, V.N. Rasstrigin²

*All-Russian Scientific Research and Technology Designing Institute of Equipment
and Oil Products Application in Agriculture, Tambov (1);*

All-Russian Scientific Research Institute of Agricultural Electrification, Moscow (2)

Key words and phrases: heating time; overload coefficient; current density; response surface; consumption power; specific water resistance.

Abstract: Mathematical description of water heating process in the apparatus for thermal feed processing is given. Polynomial dependence of energy work indexes of apparatus is given. Parameters of apparatus regimes under which minimum of overload coefficient and heating time with limit maximum power consumption are described.

Energetische Kennziffer der Arbeit der Aggregats für die thermische Futterbearbeitung

Zusammenfassung: Es ist mathematische Beschreibung des Prozesses der Wassererwärmung im Aggregat für die thermische Futterbearbeitung gegeben. Es sind polinomialische Abhängigkeiten der energetischen Kennziffer der Arbeit des Aggregats angeführt. Es sind die Parameter der Arbeitsweise des Aggregats beschrieben, bei denen das Minimum des Koeffizienten der Überlastung und der Erwärmungszeit mit der Bedingung der Begrenzung der maximalgebrauchten Kapazität bekommen wird.

Indices énergétiques du fonctionnement de l'engin pour le traitement thermique des fourrages

Résumé: On a donné le description mathématique du processus de chauffage de l'eau dans l'engin pour le traitement thermique des fourrages. On a cité les dépendances polynomiales des indices énergétiques du fonctionnement de l'engin. On a décrit les paramètres des régimes de l'engin, avec lesquels on assure le minimum du coefficient de la surcharge et du temps du chauffage avec la condition de la limitation de la capacité minimale consommée.
