

качества, соответствующего ГОСТ 8770-58, и в связи с сокращением количества размоллов является менее энергозатратным. Это объясняется тем, что:

1) в разработанном зубчато-роликовом измельчителе при диаметре мелющих роликов 30 мм размол идет примерно на половине длины их окружности и составляет около 45 мм, что почти в шесть раз больше, чем у вальцового станка. Этим достигается повышение качества измельчения за один проход продуктом зоны размола;

2) рабочий орган зубчато-роликового измельчителя позволяет производить измельчение зерновки в клиновидном мелющем зазоре измельчителя бороздкой вниз либо вверх — наиболее слабому своему сечению, что является оптимальным вариантом для максимального её разворачивания, извлечения и измельчения эндосперма;

3) указанные особенности конструкции машины позволяют уменьшить её массу, следовательно, себестоимость.

#### Библиографический список

1. [http://www.chem.msu.su/rus/history/R\\_ehbinder/20.html](http://www.chem.msu.su/rus/history/R_ehbinder/20.html).
2. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. — Т. 2. — 7-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1992. — 784 с.
3. Schonert K. Advances in the physical fundamentals of comminution. In: Advances in mineral processing, 1986. Littleton, P. 28.
4. Куприц Я.Н. Физико-химические основы размола зерна. — 1946. — 40 с.

5. Соколов А.Я. Технологическое оборудование предприятий по хранению и переработке зерна. — М.: Колос, 1984. — 245 с.

6. Наймушин А.А. Экспериментальное исследование процесса измельчения зерна на зубчато-роликовом измельчителе // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2013. — № 12.

7. Чеботарёв О.Н., Шаззо А.Ю., Мартыненко Я.Ф. Технология муки, крупы и комбикормов. — М.: ИКЦ «Март»; Ростов-н/Д, 2004.

#### References

1. [http://www.chem.msu.su/rus/history/R\\_ehbinder/20.html](http://www.chem.msu.su/rus/history/R_ehbinder/20.html).
2. Anur'ev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya: V 3 t.: T. 2. — 7-e izd., pererab. i dop. — M.: Mashinostroenie, 1992. — 784 s.
3. Schonert K. Advances in the physical fundamentals of comminution. In: Advances in mineral processing, 1986. Littleton, P. 28.
4. Kuprits Ya.N. Fiziko-khimicheskie osnovy razmola zerna. — M.: Zagotizdat, 1946. — 40 s.
5. Sokolov A.Ya. Tekhnologicheskoe oborudovanie predpriyatii po khraneniyu i pererabotke zerna. — M.: Kolos, 1984. — S. 245.
6. Naimushin A.A. Eksperimental'noe issledovanie protsessa izmel'cheniya zerna na zubchato-rolikovom izmel'chitele // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. — 2013. — № 12.
7. Chebotarev O.N., Shazzo A.Yu., Martynenko Ya.F. Tekhnologiya muki, krupy i kombikormov. — M.: IKTs «Mart», Rostov-n/D, 2004.



УДК 631.171:621.78

А.А. Багаев, В.Г. Резинов, Ц.И. Калинин, В.Г. Горшенин  
A.A. Bagayev, V.G. Rezinov, Ts.I. Kalinin, V.G. Gorshenin

### ЛИНЕАРИЗОВАННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКОМУ ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ

### LINEARIZED MATHEMATICAL MODEL OF DYNAMIC PROPERTIES OF DIRECT-FLOW ELECTRODE WATER HEATER BY ELECTRIC CURRENT AND VOLTAGE

**Ключевые слова:** электродный нагреватель воды, передаточная функция, математическая модель, линеаризация.

Существенным недостатком технических средств электродного нагрева, используемых в настоящее время, является невозможность обеспечения ими максимальной теплопроизводительности и минимальных затрат электроэнергии в процессе функционирования. Для устранения указанного недостатка требуется разработка замкнутой

по температуре нагреваемой воды системы регулирования, определение типа регулятора и его синтез. Целью статьи является получение линеаризованной математической модели динамических свойств проточного электродного водонагревателя по электрическому току и напряжению для последующего синтеза регулятора и формулирования законов регулирования микроконтроллера. Решение исходной модели осложняется наличием двух нелинейностей: первой является квадратичная зависимость мощности электродного водонагревателя

от напряжения и тока, второй – гиперболическая зависимость электрического сопротивления воды от выходного параметра – температуры. Известным методом решения поставленной задачи является линеаризация нелинейных зависимостей. Работа посвящена получению линеаризованной модели проточного электродного водонагревателя. В частности, в результате разложения известных квадратичных зависимостей мощности электродного водонагревателя от напряжения и тока в ряд Тейлора получены линеаризованные уравнения мощности нагревателя в функции напряжения и тока. В качестве метода линеаризации гиперболической зависимости электрического сопротивления воды от выходного параметра – температуры выбран метод кусочно-линейной аппроксимации функции  $R=f(T)$  с заданной ошибкой  $\varepsilon=const$  на каждом  $i$ -м интервале аппроксимирования. Разработана блок-схема итерационного процесса вычисления линеаризованных передаточных функций температуры нагреваемой воды по электрическому напряжению и току. Анализ полученных математических моделей, представленных передаточными функциями, свидетельствует о том, что обеспечить процесс регулирования напряжения, тока и, как следствие, мощности в функции температуры нагреваемой воды возможно путем синтеза замкнутой системы автоматического регулирования с обратной связью по температуре, установления законов регулирования и разработки на их основе программного обеспечения для программируемого логического контроллера (ПЛК), обеспечивающих регулирование коэффициентов усиления передаточных функций регулятора в функциональной температурной зависимости.

**Keywords:** *electrode water heater, transfer function, mathematical model, linearization.*

The research goal is linearized mathematical modeling of the dynamic properties of a direct-flow electrode water heater by the electric current and voltage for subsequent synthesis of the regulator and the formulation of the laws of the microcontroller regulation. The solution of the initial model is complicated by the existence of two nonlinear conditions: the first one is the square dependence of electrode water heater output capacity on the voltage and the current, and the second nonlinearity is the hyperbolic dependence of the electrical resistance of water on the output parameter, temperature. A known solution method of that problem is the linearization of non-linear dependences. The obtaining a linearized model of a direct-flow electrode water heater is discussed. In particular, as a result of Taylor expansion of the known square dependences of electrode water heater output capacity on the voltage and current, the linearized equations of the heater's output capacity as a function of voltage and current are derived. The method of piecewise linear approximation of the  $R = f(T)$  function with the prescribed error  $\varepsilon = const$  at each  $i$  interval of approximation is used as a method of linearization of the hyperbolic dependence of electrical resistance of water on the output parameter, temperature. The flowchart of iterative computation of the linearized transfer functions of the temperature of heated water in terms of the voltage and current is developed.

**Багаев Андрей Алексеевич**, д.т.н., проф., зав. каф. электрификации и автоматизации сельского хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-84-49; 913-363-44-67. E-mail: [bagaev710@mail.ru](mailto:bagaev710@mail.ru).

**Резинов Владимир Геннадьевич**, к.ф.-м.н., ст. преп., каф. электрификации и автоматизации сельского хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-84-49; 923-164-53-06. E-mail: [bagaev710@mail.ru](mailto:bagaev710@mail.ru).

**Калинин Цезарь Иванович**, к.т.н., доцент, каф. электрификации и автоматизации сельского хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-84-49. E-mail: [bagaev710@mail.ru](mailto:bagaev710@mail.ru).

**Горшенин Владимир Геннадьевич**, аспирант, каф. электрификации и автоматизации сельского хозяйства, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-84-49; 913-234-44-47. E-mail: [vladimirg88@list.ru](mailto:vladimirg88@list.ru).

**Bagayev Andrey Alekseyevich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Head, Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-84-49; 913-363-44-67. E-mail: [bagaev710@mail.ru](mailto:bagaev710@mail.ru).

**Rezinov Vladimir Gennadyevich**, Cand. Phys.-Math. Sci., Asst. Prof., Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-84-49; 923-164-53-06. E-mail: [bagaev710@mail.ru](mailto:bagaev710@mail.ru).

**Kalinin Tsezar Ivanovich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-84-49. E-mail: [bagaev710@mail.ru](mailto:bagaev710@mail.ru).

**Gorshenin Vladimir Gennadyevich**, Post-Graduate Student, Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-84-49; 913-234-44-47. E-mail: [vladimirg88@list.ru](mailto:vladimirg88@list.ru).

### Введение

В сельском хозяйстве горячую воду широко используют в системах отопления, процессах кормоприготовления, мастерских для удовлетворения санитарно-гигиенических нужд, мытья посуды на животноводческих фермах, сепараторов, пастеризаторов, молокопроводов, автоцистерн, молочных танков и т.д.

Существенным недостатком технических средств электродного нагрева, используемых в настоящее время, является невозможность обеспечения ими максимальной теплопроводности и минимальных затрат электроэнергии в процессе функционирования, т.е. не обеспечено оптимальное протекание электротермического процесса. Для устранения указанного недостатка требуются раз-

работка замкнутой по температуре нагреваемой воды системы регулирования, определение типа регулятора и его синтез.

Математическая модель и передаточная функция нагревателя по расходу нагреваемой воды в функции температуры воды получены А.А. Багаевым, Ц.И. Калинин, В.Г. Горшениным [1]. Этот способ требует наличия в технологической схеме регулируемого привода водяного насоса, что повышает инерционность регулирования, усложняет и удорожает электротермический процесс.

Другим способом является регулирование мощности в функции температуры.

Вместе с тем в настоящее время отсутствует математический аппарат, позволяющий реализовать непрерывные законы регулирования мощности устройства в функции температуры нагреваемой среды.

Одним из эффективных современных методов анализа и синтеза САР наряду с методом корневого годографа и методами «проектирования систем управления, основанными на размещении полюсов передаточной функции и использовании наблюдателей состояния» по-прежнему остается процедура анализа частотных характеристик, осуществляемая на основе получения передаточных функций объекта регулирования [2].

Математическое моделирование САР базируется на математических моделях, под которыми понимаются «записанные в форме математических соотношений совокупность знаний, представлений и гипотез о технической системе» [3].

Первичной исходной формой представления математической модели САР является система дифференциальных уравнений, отображающих динамические свойства объекта регулирования и регулятора. *Линейные*, или *линеаризованные*, математические модели в виде дифференциальных уравнений в последующем могут быть представлены передаточными функциями. Дифференциальные уравнения и соответствующие им передаточные функции могут быть определены экспериментально с использованием методов активного или пассивного эксперимента.

Вместе с тем известные эмпирические модели динамических свойств электродных водонагревателей справедливы только для определенных условий проведения электротермического процесса и дают недопустимые погрешности при их изменении [4-6]. Этому же способствует и целый ряд принимаемых при математическом моделировании упрощающих допущений. В частности, принимается неизменной во времени нагрева мощность, находящаяся в нелинейной функциональной зависимости от напряжения, тока и температуры.

Однако признано, что к методам идентификации систем, основанным на «подгонке» передаточной функции под экспериментальные данные, следует относиться с большой осторожностью [2]. Предпочтение целесообразно отдавать методам получения передаточных функций на основе математических моделей, построенных с использованием фундаментальных законов физики.

**Цель** – получение линеаризованной математической модели динамических свойств проточного электродного водонагревателя по электрическому току и напряжению для последующего синтеза регулятора и формулирования законов регулирования микроконтроллера.

#### Объект исследования

Объектом исследования является электродный проточный нагреватель жидких сред.

#### Методы исследования

Получение математической модели проточного электродного водонагревателя и соответствующей ей передаточной функции по току и напряжению основано на использовании фундаментальных законов физики, методах линеаризации нелинейных функций с использованием разложения в ряд Тейлора и кусочно-линейной аппроксимации, аналитического метода решения систем линеаризованных дифференциальных уравнений, составленных на основе баланса тепловой энергии, основных положений теории автоматического регулирования.

#### Результаты и их обсуждение

Исследуемую электротермическую систему можно представить в виде двух физических тел: нагреваемой воды и корпуса нагревателя. В этом случае теплообмен между водой, находящейся в межэлектродном пространстве, и окружающей средой запишется следующей системой уравнений в отклонениях [1]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= c_w m_w \frac{d\Delta T_w}{dt} + \Delta Q_1 \\ \Delta Q_1 &= c_{or} m_{or} \frac{d\Delta T_{or}}{dt} + \Delta Q_2 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $c_w, c_{or}$  – удельные теплоемкости воды и корпуса нагревателя;

$m_w, m_{or}$  – массы воды в межэлектродном пространстве и корпуса;

$\Delta T_w, \Delta T_{or}$  – отклонения температуры воды и корпуса от расчетных соответственно;

$\Delta P, \Delta Q_1, \Delta Q_2$  – отклонения от расчетных значений мощности и тепловых потоков от воды к корпусу и от корпуса наружному воздуху соответственно.

Введем следующие допущения:

жидкость считается однородным изотропным телом, обладающим бесконечной теплопроводностью;

теплоотдача в окружающую среду происходит мгновенно;

парообразование исключено;

тепловой поток в окружающую среду пропорционален разности температур установки и окружающей среды;

теплоемкость воды, теплоотдача от температуры не зависят;

температура окружающей среды в процессе нагрева не изменяется;

расход нагреваемой воды постоянен.

Вместо тепловых потоков в уравнения системы (1) подставим их значения, выраженные через удельные теплоемкости воды и корпуса устройства, их массы, отклонения температур, площадь поверхности теплопередачи и коэффициенты теплообмена:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= c_w m_w \frac{d\Delta T_w}{dt} + F_{oz} \alpha_{вн} (\Delta T_w - \Delta T_{oz}) \\ F_{oz} \alpha_{вн} (\Delta T_w - \Delta T_{oz}) &= \\ &= c_{oz} m_{oz} \frac{d\Delta T_{oz}}{dt} + F_{oz} \alpha_{нар} (\Delta T_w - T_{нар}) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $F_{ог}$  – площадь ограждения;

$T_{в}, T_{ог}$  – температура воды и ограждения корпуса соответственно;

$\alpha_{вн}, \alpha_{нар}$  – коэффициенты теплообмена на внутренней и внешней поверхностях корпуса;

$T_{нар}$  – температура окружающей среды.

Уравнения системы (2) можно было бы считать линейными, если бы неизвестная квадратичная зависимость мощности  $P$  от напряжения  $U$  и тока  $I$

$$P = \frac{U^2}{R} = I^2 R, \quad (3)$$

где  $R$  – сопротивление нагреваемой воды, Ом.

В этой ситуации методология математического моделирования подразумевает движение в двух направлениях. Первое – анализ и моделирование динамических свойств нелинейных технических систем, что требует использования нетривиального математического аппарата, применения специфических экспериментальных методов и наличия достаточно опыта исследователя. Второе – линеаризация нелинейных зависимостей известными средствами. На начальном этапе исследования предпочтение целесообразно отдать второму направлению моделирования. И лишь затем после анализа полученных результатов, сформулировав направление и определив средства дальнейших исследований, приступить к синтезу нелинейной системы автоматического регулирования.

Работа посвящена получению линеаризованной модели проточного электродного водонагревателя.

В частности, в результате разложения выражения (3) в ряд Тейлора при  $U=U_0, I=I_0$  пренебрежения нелинейными членами ряда в виду их малости, определения производных  $dP/dU$  и  $dP/dI$  получены следующие линеаризованные уравнения мощности нагревателя в функции напряжения и тока [3]:

$$\Delta P = \frac{2U_0}{R} \Delta U \quad (4)$$

или

$$\Delta P = 2I_0 R \Delta I. \quad (5)$$

В еще большей степени осложняет процесс математического моделирования динамических свойств водонагревателя гиперболическая зависимость электрического сопротивления воды  $R$  от выходного параметра – температуры  $T$  [7]:

$$R = \frac{40\rho_{293}k_{эр}}{h(T-253)}. \quad (6)$$

где  $\rho_{293}$  – удельное электрическое сопротивление воды при температуре 293°К, Ом·см;

$k_{эр}$  – геометрический коэффициент электродной системы;

$h$  – высота электродной системы, м;

$T$  – температура, К.

Одним из возможных методов линеаризации выражения (6) можно считать кусочно-линейную аппроксимацию функции  $R = f(T)$  с заданной ошибкой  $\varepsilon = const$  на каждом  $i$ -м интервале аппроксимирования.

Алгоритм кусочно-линейной аппроксимации гиперболической функции  $R = f(T)$ , иллюстрируемый рисунком 1, следующий:

1) задается погрешность аппроксимации  $\varepsilon$ ;

2) определяется температура  $T_B^{(2)}$ :

$$\frac{|R_1 - R_2|}{R_1} = \varepsilon \quad (7)$$

или

$$\frac{40\rho_{293}k_{эр}}{h(T_B^{(1)}-253)} - \frac{40\rho_{293}k_{эр}}{h(T_B^{(2)}-253)} = 2\varepsilon. \quad (8)$$

Результатом преобразования (8) относительно  $T_B^{(2)}$  является

$$T_B^{(2)} = \frac{T_B^{(1)} - 506\varepsilon}{1 - 2\varepsilon}. \quad (9)$$

3. Определяется  $R_{1/2}$  на первом интервале  $i=1$

$$\begin{aligned} R_{1/2} &= \frac{R_1 + R_2}{2} = \frac{40\rho_{293}k_{эр}}{h(T_B^{(1)}-253)} + \frac{40\rho_{293}k_{эр}}{h(T_B^{(2)}-253)} = \\ &= \frac{40\rho_{293}k_{эр} [T_B^{(1)} + T_B^{(2)} - 506]}{2h(T_B^{(1)} - 253)(T_B^{(2)} - 253)} = const. \end{aligned}$$



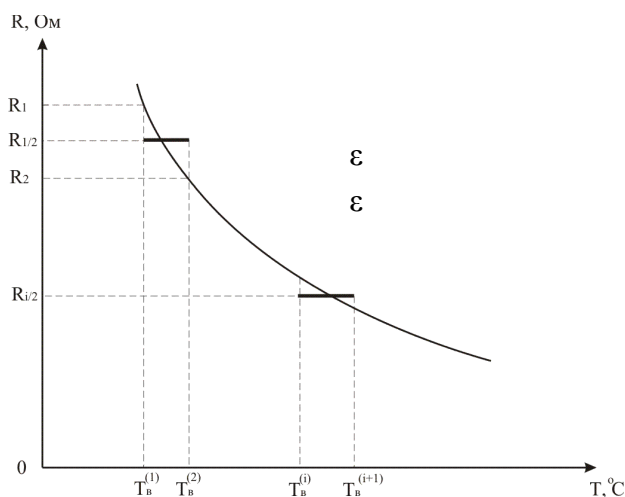


Рис. 1. Пояснения к алгоритму кусочно-линейной аппроксимации гиперболической функции  $R = f(T)$

4. Тогда на произвольном  $i$ -м интервале имеем

$$R_{i/2} = \frac{40\rho_{253}k_{эр}[T_b^{(i)} + T_b^{(i+1)} - 506]}{2h(T_b^{(i)} - 253)(T_b^{(i+1)} - 253)}, \quad (10)$$

где  $T_b^{(i+1)} = \frac{T_b^{(i)} - 506\varepsilon}{1 - 2\varepsilon}$ .

С учетом (10) выражения (4) и (5) принимают следующий линейризованный на каждом  $i$ -м интервале вид:

$$\Delta P = \frac{2U_o}{R_{i/2}} \Delta U \quad (11)$$

или

$$\Delta P = 2I_o R_{i/2} \Delta I. \quad (12)$$

Решая систему уравнений (2) относительно  $\Delta T_b$  и  $\Delta P$  и применив преобразование Лапласа, получим:

$$(T_1 p^2 + T_2 p + 1) \Delta T_b = \frac{\alpha_{нар} + 1}{F_{ог} \alpha_{нар}} (T_3 p + 1) \Delta P + C, \quad (13)$$

где  $T_1 = \frac{C_{o_2} \cdot m_{o_2} \cdot C_{в} \cdot m_{в}}{F_{o_2}^2 \cdot \alpha_{вн} \cdot \alpha_{нар}}$ ;

$$T_2 = \left( C_{o_2} \cdot m_{o_2} + C_{в} \cdot m_{в} \left( \frac{\alpha_{нар} + 1}{\alpha_{вн}} \right) \right) \frac{1}{\alpha_{нар} \cdot F_{o_2}}$$

$$T_3 = \frac{C_{o_2} \cdot m_{o_2}}{F_{o_2} \cdot \alpha_{вн}} \cdot \frac{1}{\left( \frac{\alpha_{нар} + 1}{\alpha_{вн}} \right)}$$

$$C = T_{нар}.$$

Результатом подстановки (11), (12) в (13) является

$$(T_1 p^2 + T_2 p + 1) \Delta T_b =$$

$$= \frac{\alpha_{нар} + 1}{F_{ог} \alpha_{нар}} (T_3 p + 1) \frac{2U_o}{R_{i/2}} \Delta U + C, \quad (14)$$

$$(T_1 p^2 + T_2 p + 1) \Delta T_b =$$

$$= \frac{\alpha_{нар} + 1}{F_{ог} \alpha_{нар}} (T_3 p + 1) 2I_o R_{i/2} \Delta I + C. \quad (15)$$

Выражения (14) и (15) позволяют получить передаточные функции проточного электродного водонагревателя по напряжению и току:

$$W(p) = \frac{\Delta T_b}{\Delta U} = \frac{k_1 (T_3 p + 1)}{(T_1 p^2 + T_2 p + 1)}, \quad (16)$$

где  $k_1 = \frac{\alpha_{нар} + 1}{F_{ог} \alpha_{нар}} \cdot \frac{2U_o}{R_{i/2}}$ ;

$$W(p) = \frac{\Delta T_b}{\Delta I} = \frac{k_2 (T_3 p + 1)}{(T_1 p^2 + T_2 p + 1)}, \quad (17)$$

где  $k_2 = \frac{\alpha_{нар} + 1}{F_{ог} \alpha_{нар}} \cdot 2I_o R_{i/2}$ .

Изложенный подход позволяет считать  $R = const$  в рамках  $i$ -го интервала итерационного процесса и моделировать динамические свойства водонагревателя линейризованными передаточными функциями.

Блок-схема итерационного процесса вычисления линейризованных передаточных функций вида (16) и (17) представлена на рисунке 2.

### Выводы

Анализ полученных математических моделей, представленных передаточными функциями (16) и (17), свидетельствует о том, что при неизменных постоянных времени  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  обеспечить процесс регулирования напряжения, тока и, как следствие, мощности в функции температуры нагреваемой воды возможно путем синтеза замкнутой САР с обратной связью по температуре, установления законов регулирования и разработки программного обеспечения для программируемого логического контроллера (ПЛК), обеспечивающих регулирование коэффициентов усиления  $k_1$  и  $k_2$  регулятора в указанной функциональной температурной зависимости.

Регулирование напряжения или тока в системе автоматического регулирования (САР) с обратной связью по температуре может реализовано методом широтно-импульсной модуляции посредством автономного инвертора напряжения (АИН) или автономного инвертора тока (АИТ), управляемых с помощью программируемого логического контроллера ПЛК.

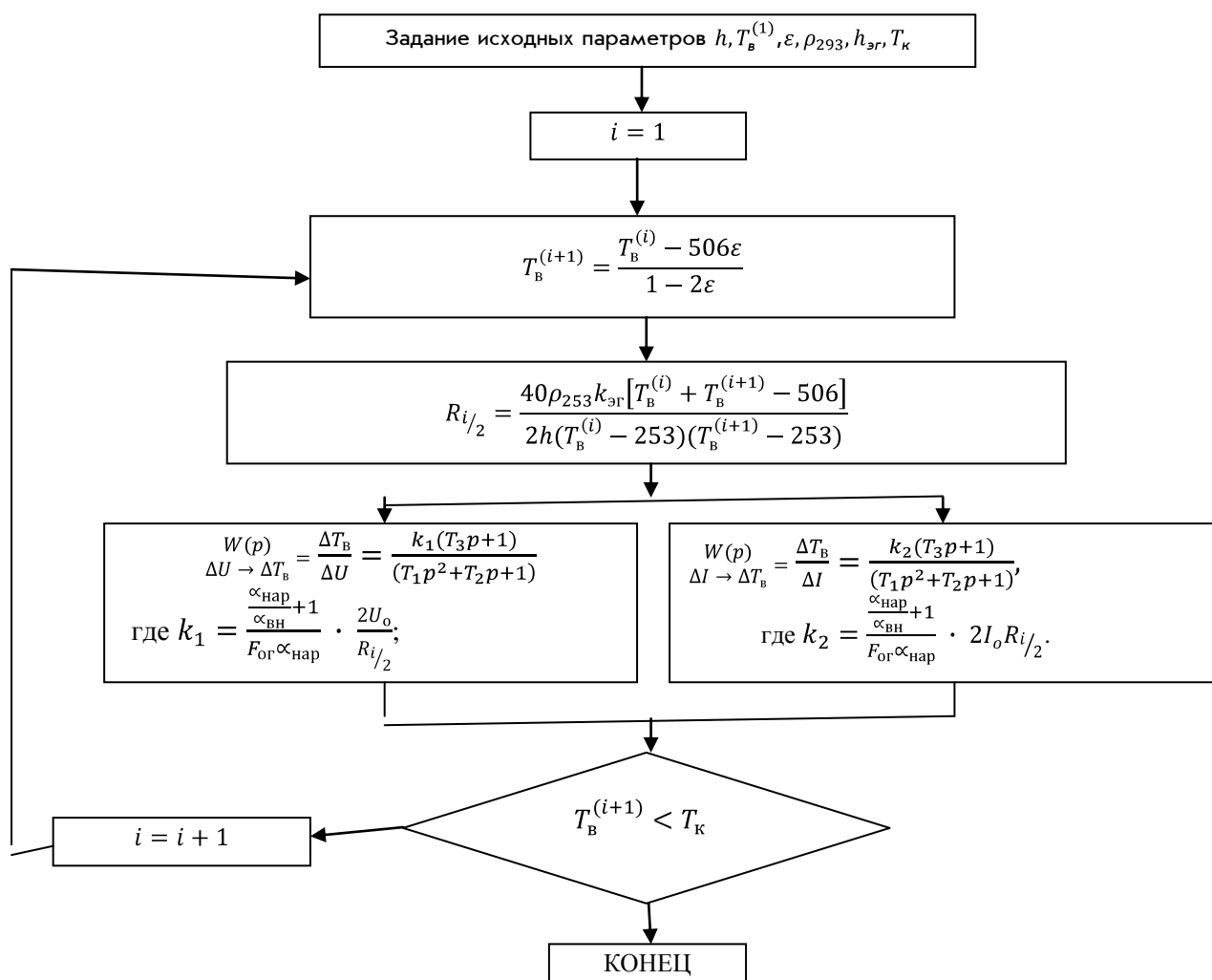


Рис. 2. Блок-схема итерационного процесса вычисления передаточной функции вида (16) и (17)

**Библиографический список**

- Багаев А.А., Калинин Ц.И., Горше-нин В.Г. Передаточная функция электродного водонагревателя по возмущающему воздействию // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – Барнаул, 2012. – № 8(94). – С. 122-125.
- Phillips C.L., Harbor R.D. Feedback control systems. – New Jersey: Prentice Hall, Inc., 2000. – P. 616.
- Карташов Б.А. Практикум по автоматике. Математическое моделирование систем автоматического регулирования. – М.: КолосС, 2006. – 184 с.
- Багаев А.А., Калинин Ц.И., Горше-нин В.Г., Булавцев В.И. Экспериментальное определение передаточной функции электродного водонагревателя по его кривой разгона // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – Барнаул, 2013. – № 5. – С. 114-118.
- Кудрявцев И.Ф., Шкляр О.С., Матюни-на Л.Н. Автоматизация производственных процессов на фермах. – М.: Колос, 1976. – 288 с.
- Королев В.А. Динамика процессов электродного нагрева жидкостей: учебное

пособие. – Л.: Изд-во Ленинградского орде-на Трудового Красного Знамени сельскохо-зяйственного института, 1988. – 40 с.

- Басов А.М., Быков В.Г., Лаптев А.В., Файн В.Б. Электротехнология. – М.: Агро-промиздат, 1985. – 256 с.

**References**

- Bagaev A.A., Kalinin Ts.I., Gorshe- nin V.G. Peredatochnaya funktsiya elektrodno- go vodonagrevatelya po vozmushchayushchemu vo- zdeistviyu // Vestnik Altaiskogo gosudarstven- nogo agrarnogo universiteta. – 2012. – № 8 (94). – S. 122-125.
- Phillips C.L., Harbor R.D. Feedback control systems. – New Jersey: Prentice Hall, Inc., 2000. – P. 616.
- Kartashov B.A. Praktikum po avtomatike. Matematicheskoe modelirovanie sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. – M.: KolosS, 2006. – 184 s.
- Bagaev A.A., Kalinin Ts.I., Gorshe- nin V.G., Bulavtsev V.I. Eksperimental'noe opredelenie peredatochnoi funktsii elektrodno- go vodonagrevatelya po ego krivoi razgona // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2013. – № 5. – S. 114-118.

5. Kudryavtsev I.F., Shklyar O.S., Matyunina L.N. Avtomatizatsiya proizvodstvennykh protsessov na fermakh. – М.: Kolos, 1976. – 288 с.

6. Korolev V.A. Dinamika protsessov elektrodnoogo nagreva zhidkosti: uchebnoe posobie. – L.: Izd-vo Leningradskogo ordena Tru-

dovogo Krasnogo Znameni sel'skokhozyaistvennogo instituta, 1988. – 40 с.

7. Basov A.M., Bykov V.G., Laptev A.V., Fain V.B. Elektrotekhnologiya. – М.: Agropromizdat, 1985. – 256 с.



УДК 631.362

**Н.И. Стрикунов, С.В. Леканов**  
N.I. Strikunov, S.V. Lekanov

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ  
ДЕЛИТЕЛЬНОГО РЕШЕТА ЦЕНТРОБЕЖНО-РЕШЕТНОГО ВОРОХООЧИСТИТЕЛЯ**

**INCREASE OF THROUGHPUT CAPACITY OF DIVIDING SCREEN  
OF CENTRIFUGAL SIEVE PRECLEANING SEPARATOR**

*Ключевые слова:* делительное решето, зерновой материал, питатель, пропускная способность, кольцевой зазор, гребок, угловая скорость, окружная скорость.

*Keywords:* dividing screen, grain material, feeding device, throughput capacity, circular clearance, skim bar, angular rate, circumferential speed.

Одним из наиболее существенных способов дальнейшего повышения эффективности сепарирования является предварительная подготовка зернового материала, заключающаяся в расслоении его путем пропуска через коническое делительное решето перед поступлением на сепарирующую поверхность цилиндрического решета. Раскрыта и оценена возможность интенсификации процесса сепарации за счет использования делительного решета. Определены рациональные параметры устройства для предварительной подготовки зернового материала. Для обоснования параметров и аналитического определения требуемой пропускной способности делительного решета разработана конструктивная схема устройства. Показана эффективность применения делительного решета в технологической схеме центробежно-решетного ворохоочистителя при обработке различных культур. Исследования в области центробежно-решетного сепарирования показывают, что на процесс сепарирования существенное влияние оказывают конструктивно-кинематические и технологические параметры. Особенно ощутима их взаимосвязь при работе сепаратора в режиме ворохоочистителя. Показано теоретически и подтверждено экспериментально предложенное новое техническое решение. Эти исследования подтверждают на целесообразность применения гребков в конструкции машины.

One of the most substantial methods for further separation improvement is preliminary preparation of grain, its separation by means of passing it through conical dividing screen before feeding to the separating surface of cylindrical screen. The possibility to intensify the separation process by means of dividing screen application is revealed and appraised. Reasonable parameters of the device for preliminary preparation of grain are defined. The structural design of dividing screen is developed in order to provide rationalization for parameters and analytical definition of the dividing screen throughput requirement. The efficiency of the dividing screen application in the technological scheme of centrifugal-screen precleaning separators in the process of different crops treatment is proved. The research of centrifugal-screen separation shows that the process of separation is sufficiently influenced by constructive-kinematic and technological parameters. The relationship of those parameters is especially important when the separator works in the mode of precleaning separation. The proposed new technology concept is theoretically shown and experimentally proved. The research shows the efficiency of skim bar application in the machine design.