

**М. А. Прищепов, И. Г. Рутковский**

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»  
г. Минск, Республика Беларусь  
E-mail: pma.eshp@gmail.com*

## **ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ЭЛЕКТРОТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ПРОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЕЙ**

*Аннотация.* В статье сформулированы рекомендации по выбору электротепловой схемы электродного электронагревателя с учетом технико-экономических параметров.

*Ключевые слова:* электродный электронагреватель, плотность тока, материалоемкость, тепловая инерционность, информационный сигнал.

**M. A. Prishchepov, I. G. Rutkouski**

*EI "Belarusian State Technological Agrarian University"  
Minsk, Republic of Belarus  
E-mail: pma.eshp@gmail.com*

## **JUSTIFICATION OF THE CHOICE OF THE ELECTRIC THERMAL CIRCUIT OF FLOW- THROUGH ELECTRODE ELECTRIC HEATERS**

*Abstract.* The article formulates recommendations on the choice of an electric thermal circuit of an electrode electric heater, taking into account technical and economic parameters.

*Keywords:* electrode electric heater, current density, material consumption, thermal inertia, information signal.

### **Введение**

В настоящее время для тепловой обработки широко используется косвенный электронагрев. Однако ограниченная теплопроводность обрабатываемых сред и невысокая допустимая температура на контактной поверхности теплообмена вызывает техническое противоречие между низкой температурой нагрева обрабатываемой среды и высокой температурой теплогенерирующих элементов [1]. Ситуация усугубляется также проблематичностью оценки температуры в электронагревательных установках (ЭНУ), поскольку серийно выпускаемые датчики температуры (заключенные в защитный кожух) имеют существенную инерционность. Для предотвращения указанных выше недостатков требуется принятие дополнительных мер по обеспечению равномерности нагрева и оценки температуры в ЭНУ. При быстротечности процессов термообработки термолabileльных сред для упрощения системы автоматического регулирования (САР) регулирования температуры электродных электронагревателей (ЭЭН) необходимо проводить с использованием малоинерционных датчиков температуры или электродных электронагревателей-датчиков (ЭЭН-Д), в которых в качестве термочувствительного элемента используется термозависимое сопротивление нагреваемой среды. При этом измерение её сопротивления наиболее просто и с высокой точностью можно производить методом нулевого или дифференциального сравнения. Для этого ЭЭН-Д должен иметь один или несколько промежуточных электродов и градиент температуры в обрабатываемой среде [2]. Допустимые технологические параметры ЭЭН для тепловой обработки сельскохозяйственных термолabileльных сред, такие как плотность тока и скорость движения в межэлектродном пространстве, определяются исходя из электрохимических процессов, протекающих под воздействием электрического тока и отложений, образующихся на электродах [1–3]. При использовании ЭЭН возникает вопрос обоснования выбора электротепловой схемы (ЭТС) ЭЭН, для обеспечения требований технологического процесса к обеспечению режима электротеп-

ловой обработки сельскохозяйственных термолabileльных сред, при минимальной материалоемкости и тепловой инерционности ЭНУ.

Цель данной статьи – обосновать выбор ЭТС ЭЭН текучих токопроводящих сред, обеспечивающей требуемую равномерность нагрева при минимальной материалоемкости и тепловой инерционности ЭЭН с возможностью контроля температуры обрабатываемой среды.

### Основная часть

Правильный выбор ЭТС ЭЭН позволяет вести электронагрев при минимуме затрат. Наиболее равномерный нагрев по ширине электродов обеспечивают следующие типовые ЭТС проточных ЭЭН: однозонного ЭЭН с плоскопараллельной электродной системой (1Z), ЭЭН с секционированной электродной системой (CZ) и зонированной электродной системой (рис. 1).

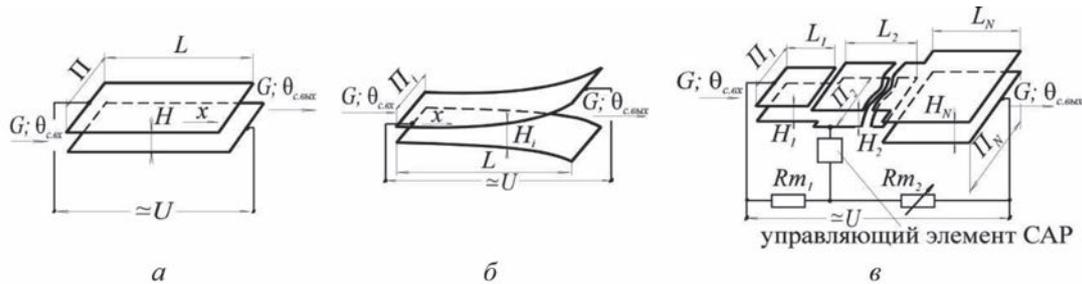


Рис. 1. Типовые ЭТС проточных ЭЭН: 1Z ЭЭН (а), с секционированной (б) и зонированной (в) электродной системой;  $G$  – массовый расход обрабатываемой среды, кг/с;  $L$  – длина электродов ЭЭН, В;  $\theta_{c,вх}$ ,  $\theta_{c,вых}$  – температура на входе и на выходе ЭЭН, °С;  $R_{m1}$ ,  $R_{m2}$  – термнезависимые сопротивления измерительного моста ЭЭН-Д, Ом;  $N$  – количество последовательно соединенных зон (на единицу меньше количества электродов электродной системы ЭЭН);  $U$  – напряжение питания, CAP – система автоматического регулирования.

Электротепловые процессы (ЭТП), происходящие в представленных ЭЭН вдоль канала протекания среды во времени, описываются следующим дифференциальным уравнением [1]:

$$C_p \cdot \rho_c \cdot H_i \cdot \Pi_i \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} + C_p \cdot G \cdot \frac{\partial \theta_c}{\partial x} = \frac{U_i^2 \cdot \Pi_i \cdot \eta}{\rho_t(\theta_c) \cdot H_i},$$

где  $C_p$  – удельная теплоемкость обрабатываемой среды, Дж/(кг·°С);  $\rho_c$  – плотность обрабатываемой среды, кг/м<sup>3</sup>;  $H_i$  – межэлектродное расстояние ( $H_i = H$  – при расчете ЭТП в 1Z ЭЭН), м;  $\Pi_i$  – ширина электродов ( $\Pi_i = \Pi$  – при расчете ЭТП в 1Z ЭЭН), м;  $\theta_c$  – температура обрабатываемой среды, °С;  $U_i$  – напряжение питания на  $i$ -й секции (зоне) электронагревателя ( $U_i = U$  – при расчете ЭТП в 1Z и CZ ЭЭН), В;  $x$  – текущая координата длины ЭЭН, м;  $\eta$  – коэффициент полезного действия, о.е;  $\rho_t$  – удельное сопротивление обрабатываемой среды, Ом·м.

При описании ЭТП в проточном ЭЭН-Д с зонированной электродной системой (рис. 1, в) к уравнению (1), записанному для  $i$ -го участка (секции) любой  $k$ -й зоны, необходимо дополнить систему уравнений для вычисления напряжения  $U_k$  на  $k$ -й зоне ЭЭН-Д [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_k = \sum_{k=1}^N I \cdot R_k; \\ I = U / R; \\ R = \sum_{k=1}^N R_k; \\ R_k = \int_0^{L_k} \rho_t(\theta_c) dx \cdot \int_0^{L_k} H_k dx / \left( \int_0^{L_k} \Pi_k dx \cdot L_k^2 \right), \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $I$  – текущее значение полного тока ЭЭН-Д, А;  $R_k$  – сопротивление  $k$ -й зоны ЭЭН-Д, Ом;  $R$  – полное сопротивление ЭЭН-Д, Ом;  $L_k$  – длина электродов  $k$ -й зоны ЭЭН-Д, м.

При расчете величины информационного сигнала (ИС) в измерительной диагонали моста ЭЭН-Д  $\Delta U$  (рис. 1, в) используется выражение (3) [2]:

$$\Delta U = U \cdot R_{pr} \cdot \frac{Rm_3 \cdot Rm_2 - Rm_4 \cdot Rm_1}{Rm_{12} \cdot R_{pr} \cdot R + Rm_3 \cdot Rm_4 \cdot Rm_{12} + Rm_1 \cdot Rm_2 \cdot R}, \quad (3)$$

где  $R_{pr}$  – внутреннее сопротивление измерительного прибора, Ом;  $Rm_3, Rm_4$  – термозависимые сопротивления ЭЭНД, образующие мостовую измерительную схему, Ом;  $Rm_{12} = Rm_1 + Rm_2$  – сумма термозависимых сопротивлений мостовой измерительной схемы, Ом;  $R = Rm_3 + Rm_4$  – термозависимое сопротивление ЭЭНД, Ом.

В связи с температурной зависимостью удельного сопротивления обрабатываемой среды плотность тока в межэлектродном пространстве возрастает при электротепловой обработке. Снижение материалоемкости и тепловой инерционности ЭНУ с ЭЭН ограничивается величиной допустимой плотности тока. Для сравнительного анализа эффективности ЭНУ на базе секционированных и зонированных ЭЭН сравнивались характеристики секционированных (CZ) ЭЭН, двух (2Z)-, трех (3Z)- и четырехзонного (4Z) ЭЭН-Д с 1Z ЭЭН.

Проточный 1Z ЭЭН характеризуется следующими параметрами:  $L = 0,0163$  м;  $\Pi = 0,04$  м;  $H = 0,0163$  м;  $\rho_o = 37,9$  Ом·м;  $\alpha_T = -0,009$  1/°C;  $G = 0,002$  кг/с;  $C_p = 4174$  кДж/(кг·°C);  $\rho_c = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $U = 220$  В;  $\eta = 0,95$ .

CZ ЭЭН –  $\Pi = 0,04$  м;  $\eta = 0,95$ ;  $X_1 = 0,001$  м;  $H_1 = 0,0104$  м;  $X_2 = 0,011$  м;  $H_2 = 0,0107$  м;  $X_3 = 0,021$  м;  $H_3 = 0,0110$  м;  $X_4 = 0,031$  м;  $H_4 = 0,0115$  м;  $X_5 = 0,041$  м;  $H_5 = 0,0120$  м;  $X_6 = 0,051$  м;  $H_6 = 0,0127$  м;  $X_7 = 0,061$  м;  $H_7 = 0,0136$  м;  $X_8 = 0,071$  м;  $H_8 = 0,0147$  м;  $X_9 = 0,081$  м;  $H_9 = 0,0160$  м;  $L = 0,084$  м;  $H_{10} = 0,0163$  м;  $C_p = 4174$  кДж/(кг·°C);  $\rho_c = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_o = 37,9$  Ом·м;  $\alpha_T = -0,009$  1/°C;  $G = 0,002$  кг/с;  $U = 220$  В.

Двухзонный (2Z) ЭЭН-Д –  $\Pi = 0,04$  м;  $H = 0,0072$  м;  $L_1 = 0,101$  м;  $L_2 = 0,089$  м;  $\eta = 0,95$ ;  $\rho_o = 37,9$  Ом·м;  $\alpha_T = -0,009$  1/°C;  $G = 0,002$  кг/с;  $C_p = 4174$  кДж/(кг·°C);  $\rho_c = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $U = 220$  В.

Трехзонный (3Z) ЭЭН-Д –  $\Pi = 0,04$  м;  $H = 0,0046$  м;  $L_1 = 0,099$  м;  $L_2 = 0,089$  м;  $L_3 = 0,083$  м;  $\eta = 0,95$ ;  $C_p = 4174$  кДж/(кг·°C);  $\rho_c = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_o = 37,9$  Ом·м;  $\alpha_T = -0,009$  1/°C;  $G = 0,002$  кг/с;  $U = 220$  В.

Четырехзонный (4Z) ЭЭН-Д –  $\Pi = 0,04$  м;  $H = 0,0034$  м;  $L_1 = 0,1$  м;  $L_2 = 0,09$  м;  $L_3 = 0,085$  м;  $L_4 = 0,08$  м;  $\eta = 0,95$ ;  $C_p = 4174$  кДж/(кг·°C);  $\rho_c = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_o = 37,9$  Ом·м;  $\alpha_T = -0,009$  1/°C;  $G = 0,002$  кг/с;  $U = 220$  В.

Исследование проводилось при температуре на входе  $\theta_{c\text{ ввх}} = 5$  °C, на выходе  $\theta_{c\text{ вых}} = 60$  °C. Расчет электродных систем и характеристик ЭЭН и ЭЭН-Д проводился с использованием численных методик расчета. Разработанные математические модели и алгоритмы их исследования [1, 2] позволили проводить расчет электротепловых характеристик, включая и величину ИС ЭЭН-Д, с погрешностью, не превышающей 5–10 % относительно экспериментальных данных, что достаточно для их использования как в практическом проектировании ЭНУ, так и для сравнительного анализа их характеристик.

Неравномерность плотности тока  $\delta_{\Delta J i}$  соответственно для 1Z и CZ ЭЭН, а также для 2Z, 3Z и 4Z проточного ЭЭН-Д рассчитывались по выражению:

$$\delta_{\Delta J i} = ((J_{\max i} - J_{\min i}) / J_{\min i}) \cdot 100, \quad (4)$$

где  $J_{\max i}$  – максимальное значение плотности тока на секции ЭЭН, А/м<sup>2</sup>;  $J_{\min i}$  – минимальное значение плотности тока на секции ЭЭН, А/м<sup>2</sup>;  $i$  – индекс, соответствующий 1Z и, CZ ЭЭН, 2Z, 3Z и 4Z проточному ЭЭН-Д.

Снижения неравномерности плотности тока  $\Delta\delta_{\Delta J i}$  для указанных проточных ЭЭН и ЭЭН-Д рассчитывались по формуле:

$$\Delta\delta_{\Delta J i} = ((\delta_{\Delta J 1Z} - \delta_{\Delta J i}) / \delta_{\Delta J 1Z}) \cdot 100, \quad (5)$$

где  $i$  принимает, соответственно, значения CZ, 2Z, 3Z и 4Z.

Результаты расчета снижения неравномерности плотности тока проточного CZ ЭЭН, 2Z, 3Z и 4Z ЭЭН-Д, по сравнению с проточным 1Z ЭЭН представлены в табл. 1.

Таблица 1. Снижение неравномерности плотности тока проточного CZ ЭЭН, 2Z, 3Z и 4Z ЭЭН-Д по сравнению с проточным 1Z ЭЭН

ЭТС ЭЭН	Минимальная плотность тока $J_{\min}$ , А/м <sup>2</sup>	Максимальная плотность тока $J_{\max}$ , А/м <sup>2</sup>	Относительная неравномерность $\Delta\delta_{J_p}$ , %	Снижение неравномерности плотности тока в сравнении с 1Z ЭЭН, %
Проточный 1Z ЭЭН	372,35	796,11	113,81	–
Проточный CZ ЭЭН	581,23	764,88	31,60	$D\delta_{CZ\text{ЭЭН}}=72,24$
Проточный 2Z ЭЭН-Д	467,83	767,99	64,16	$D\delta_{2\text{ЭЭН}}=43,62$
Проточный 3Z ЭЭН-Д	500,97	766,76	53,06	$D\delta_{3\text{ЭЭН}}=53,38$
Проточный 4Z ЭЭН-Д	510,25	766,18	50,16	$D\delta_{4\text{ЭЭН}}=55,93$

Изменение материалоемкости (площади электродов), соответственно, указанных выше проточных ЭЭН  $\Delta\delta_{S_i}$  по отношению к проточному 1Z ЭЭН рассчитывается по выражению:

$$\delta_{S_i} = ((S_{1Z} - S_i) / S_{1Z}) \cdot 100, \quad (6)$$

где  $S_i$  – площади электродов соответствующих, указанных выше, проточных ЭЭН, м<sup>2</sup>;  $S_{1Z}$  – площадь электродов проточного 1Z ЭЭН, м<sup>2</sup>.

Результаты расчета изменения материалоемкости (площади электродов) проточного CZ ЭЭН, 2Z, 3Z и 4Z ЭЭН-Д по сравнению с проточным 1Z ЭЭН представлены в табл. 2.

Таблица 2. Изменение материалоемкости (площади электродов) проточного CZ, 2Z, 3Z и 4Z ЭЭН по сравнению с проточным 1Z ЭЭН

Название ЭЭН	Площадь электродов $S_p$ , м <sup>2</sup>	Изменение площади электродов $\delta_{S_p}$ , %
Проточный 1Z ЭЭН	0,00888	–
Проточный CZ ЭЭН	0,00672	–24,32
Проточный 2Z ЭЭН-Д	0,01520	71,17
Проточный 3Z ЭЭН-Д	0,02168	144,14
Проточный 4Z ЭЭН-Д	0,02840	219,82

Тепловая инерционность объекта характеризуется постоянной времени  $T$ . Это время, в течение которого температура объекта достигнет 0,638 установившейся температуры. Снижение тепловой инерционности (постоянной времени нагрева) указанных выше проточных ЭЭН  $\Delta\delta_{T_i}$  по отношению к проточному 1Z ЭЭН рассчитывается по уравнению:

$$\delta_{T_i} = ((T_{1Z} - T_i) / T_{1Z}) \cdot 100, \quad (7)$$

где  $T_i$  – постоянная времени нагрева проточного CZ ЭЭН, 2Z, 3Z и 4Z ЭЭН-Д, с;  $T_{1Z}$  – постоянная времени нагрева 1Z проточного ЭЭН, с.

Результаты расчета снижения тепловой инерционности (постоянной времени нагрева) проточного CZ ЭЭН, 2Z, 3Z и 4Z ЭЭН-Д по сравнению с проточным 1Z ЭЭН представлены в табл. 3.

Таблица 3. Снижение тепловой инерционности (постоянной времени нагрева) проточного CZ, 2Z, 3Z и 4Z ЭЭН по сравнению с проточным 1Z ЭЭН

Название ЭЭН	Постоянная времени $T_p$ , с	Снижение тепловой инерционности $\Delta\delta_{T_p}$ , %
Проточный 1Z ЭЭН	24,49	–
Проточный CZ ЭЭН	15,87	35,20
Проточный 2Z ЭЭН-Д	19,61	19,93
Проточный 3Z ЭЭН-Д	17,86	27,07
Проточный 4Z ЭЭН-Д	16,85	31,20

При подключении параллельно ЭЭН двух последовательно соединенных сопротивлений (постоянного и переменного)  $Rm1$ ,  $Rm2$ , вместе с двумя термозависимыми сопротивлениями, образующимися между фазным и промежуточным электродом, а также нулевым и промежуточным электродом, образуется измерительный мост (рис. 1, в). Сигнал разбаланса моста снимается с промежуточного электрода и точки соединения постоянного и переменного последовательно соединенных сопротивлений. Измерительный мост балансируется при холодном состоянии обрабатываемой среды между электродами. При этом суммарное значение дополнительных сопротивлений  $Rm1$  и  $Rm2$  составляет 6700 Ом. К измерительной диагонали моста подключался электроизмерительный прибор с внутренним сопротивлением  $R_{pr} = 10000$  Ом. При нагреве изменяются сопротивления плеч мостовой схемы, что приводит к разбалансу моста и увеличению уровня ИС в его диагонали. Такой ЭЭН возможно использовать в качестве ЭЭН-Д.

Следует также отметить, что на величину ИС разбаланса моста  $\Delta U$ , помимо температуры на выходе из ЭЭН-Д  $\theta_{c.вых}$ , оказывает влияние напряжение питания  $U$ , величина массового расхода обрабатываемой среды  $G$  и температура на входе в ЭЭН-Д  $\theta_{c.вх}$ , что объясняется изменением мощности ЭЭН-Д и соответствующим изменением температуры обрабатываемой среды на выходе нагревателя  $\theta_{c.вых}$ . Также на величину ИС оказывает влияние соотношение термозависимых сопротивлений измерительного моста, т. е. выбор промежуточного электрода в качестве измерительного и ТКС обрабатываемой среды. Получаемый ИС может использоваться для сигнализации аварийных режимов работы и контроля отклонений от требуемых режимов технологического процесса.

Относительное повышение величины ИС характеризующего температуру нагрева в проточных ЭЭН-Д с зонированными электродными системами  $\Delta\delta_{\Delta U}$ , по сравнению с ИС, получаемым в регуляторах температуры с серийно выпускаемыми термодатчиками (термометры сопротивления ТСМ и ТСР) на примере датчика температуры РТ-100 (ТСП-100), подключенного к контроллеру AL2-14MR-A через адаптер AL2-2PT-ADP, рассчитывалось по выражению:

$$\delta_{\Delta U} = \Delta U / \Delta U_{TS}, \quad (8)$$

где  $\Delta U_{TS}$  – величина ИС в регуляторах температуры с серийно выпускаемыми термодатчиками, В.

Результаты расчета повышения величины ИС, характеризующего температуру нагрева обрабатываемой среды в 2Z, 3Z и 4Z проточных ЭЭН-Д, по сравнению с ИС датчика температуры РТ-100 (ТСП-100), подключенного к контроллеру AL2-14MR-A через адаптер AL2-2PT-ADP ( $\Delta U_{TS} = 0,011$  В), представлены в таблице 4.

**Таблица 4. Повышение величины ИС характеризующего температуру нагрева обрабатываемой среды в 2Z, 3Z и 4Z проточных ЭЭН по сравнению с ИС ТСП-100**

Название источника ИС характеризующего температуру нагрева обрабатываемой среды	Номер промежуточного электрода $j$	Величина ИС $\Delta U$ , В	Относительное увеличение величины ИС в сравнении с ИС ТСП-100 $\delta_{\Delta U}$ , %
Проточный 2Z ЭЭН-Д	1	16,31	1482
Проточный 3Z ЭЭН-Д	1	15,23	1384
	2	15,15	1376
Проточный 4Z ЭЭН-Д	1	12,99	1180
	2	16,92	1537
	3	13,01	1182

Используя проведенный анализ характеристик ЭЭН и ЭЭН-Д, можно провести выбор рациональной электротепловой схемы ЭЭН и ЭЭН-Д. Помимо этого, использование многозонных ЭЭН-Д позволяет получать мощный ИС, характеризующий температуру нагрева в межэлектродном пространстве. Кроме того, при снижении величины массового расхода обрабатываемой среды многозонного ЭЭН-Д увеличивается температура среды и уменьшается время ее нагрева. При этом напряжение разбаланса моста  $\Delta U$ , равное разбалансу моста при проектируемом режиме работы, достигается также за меньшее время, а установившееся напряжение разбаланса моста  $\Delta U$

возрастает и значительно превышает значение разбаланса для проектируемого режима работы, что возможно использовать для контроля аварийных режимов работы.

### **Заключение**

1. Секционирование электродных систем наиболее существенно снижает неравномерность плотности тока в межэлектродном пространстве, материалоемкость и тепловую инерционность ЭНУ, однако может применяться только для электротепловой обработки жидких термолабильных сред, не приводящих к образованию застойных зон.

2. Для обработки вязких термолабильных сред целесообразно использование ЭЭН с зонированной электродной системой, при этом обеспечивается возможность контроля температуры в межэлектродном пространстве и защита ЭНУ от аварийных режимов работы.

3. Сравнительный анализ проточных ЭЭН и ЭЭН-Д с плоскопараллельной, секционированной и зонированной электродными системами показал, что ЭЭН и ЭЭН-Д с секционированными и зонированными электродными системами соответственно обеспечивают снижение неравномерности плотности тока в обрабатываемой среде межэлектродного пространства на 43,62–72,24 % в сравнении с однозонным проточным ЭЭН. При использовании секционированных ЭЭН происходит снижение материалоемкости электродов на 24,32 % и тепловой инерционности на 35,20 % в сравнении с однозонным проточным ЭЭН. Использование зонированных ЭЭН и ЭЭН-Д обеспечивает высокую равномерность плотности тока при увеличении их материалоемкости на 71,17–219,82 % и снижении инерционности на 19,93–31,20 % относительно проточного ЭЭН с однозонной плоскопараллельной электродной системой. Кроме того, зонированные ЭЭН-Д позволяют получать мощный ИС о температуре нагрева среды, более чем в 1000 раз превосходящий ИС от серийно выпускаемых датчиков температуры, что упрощает систему автоматического регулирования тепловых режимов ЭНУ.

### **Список использованных источников**

1. Прищепов, М. А. К вопросу разработки проточных электродных электронагревателей (ЭЭН) / М. А. Прищепов, И. Г. Рутковский // Вопросы агроэнергетики. – Минск: Технопринт, 2001. – С. 218–223.
2. Прищепов, М. А. К вопросу анализа чувствительности зонированных электродных электронагревателей-датчиков / М. А. Прищепов, И. Г. Рутковский // Моделирование сельскохозяйственных процессов и машин : тезисы второй республиканской научно-технической конференции, Минск, 21–23 мая 1996 г. – Минск: БАТУ, 1996. – С. 22.
3. Заяц, Е. М. Основы электротехнологических методов обработки влажных кормов / Е. М. Заяц. – Минск: Ураджай, 1997. – 216 с.