

УДК 631.344.8

UDC 631.344.8

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ  
ЭЛЕКТРОАКТИВАТОРА ВОДЫ ДЛЯ  
СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ  
КИСЛОТНОСТИ ПОЧВЫ ПРИ  
ВЫРАЩИВАНИИ ТОМАТОВ В УСЛОВИЯХ  
ЗАКРЫТОГО ГРУНТА**

**MATHEMATICAL MODEL OF  
ELECTROACTIVATOR OF WATER FOR  
SYSTEM STABILIZATION OF SOIL ACIDITY  
IN GROWING TOMATOES IN GREENHOUSE**

Цокур Дмитрий Сергеевич  
аспирант  
*Кубанский государственный аграрный  
университет, Краснодар, Россия*

Tsokur Dmitriy Sergeevich  
postgraduate student  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

В статье представлены: математическая модель тепловых процессов в электроактиваторе, которая учитывает не только электрические и тепловые параметры электролита и электродов, но и их геометрические размеры, что даёт возможность проводить моделирование различных конструкций; блок-схема алгоритма моделирования тепловых процессов в проточном электроактиваторе

The article presents a mathematical model of thermal processes in electroactivator which takes into consideration not only the electrical and thermal parameters of electrolyte and electrodes, but also their geometric dimensions, which makes it possible to carry out simulation of various designs and a flowchart modeling of thermal processes in flowing electroactivator

Ключевые слова: ЭЛЕКТРОАКТИВАТОР ВОДЫ, ЭЛЕКТРОАКТИВАЦИЯ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Keywords: ELECTROACTIVATOR OF WATER, ELECTROACTIVATION OF WATER SOLUTIONS

При разработке системы стабилизации кислотности почвы для выращивания томатов в условиях закрытого грунта важно выдержать параметры обработки.

Из всех факторов, влияющих на рН генерируемых водных растворов, наиболее сложно управляемым является температура воды. Для решения этой задачи обратимся к математическому описанию тепловых процессов в электроактиваторе.

Для математического моделирования, прежде всего, необходимо определить конструкцию электроактиватора. Конструкция исследуемого проточного электроактиватора представлена на рисунке 1.

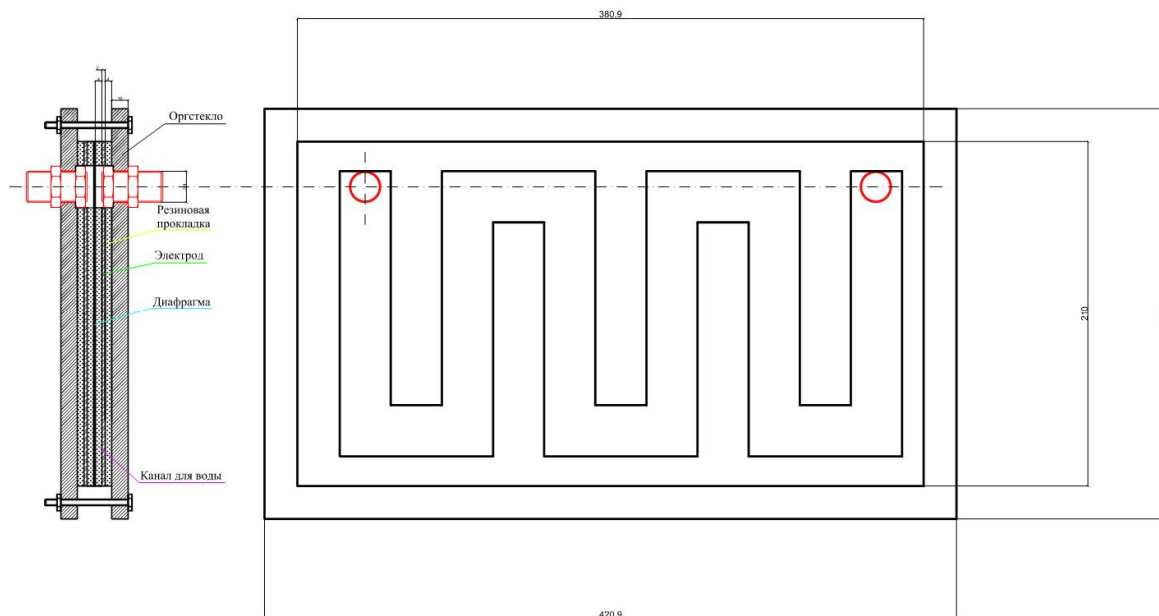


Рисунок 1 - Конструкция проточного электроактиватора

Для удобства математического моделирования и последующего моделирования различных видов канала электроактиватора разобьём его на 6 ячеек (рис. 2).

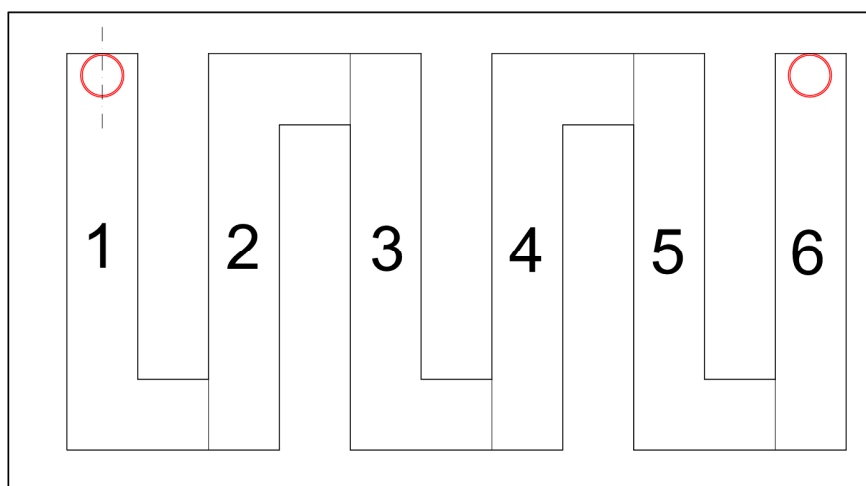


Рисунок 2 - Деление канала электроактиватора на 6 ячеек.

На рисунке 3 показаны обозначения геометрических размеров принимаемых для каждой ячейки канала электроактиватора.

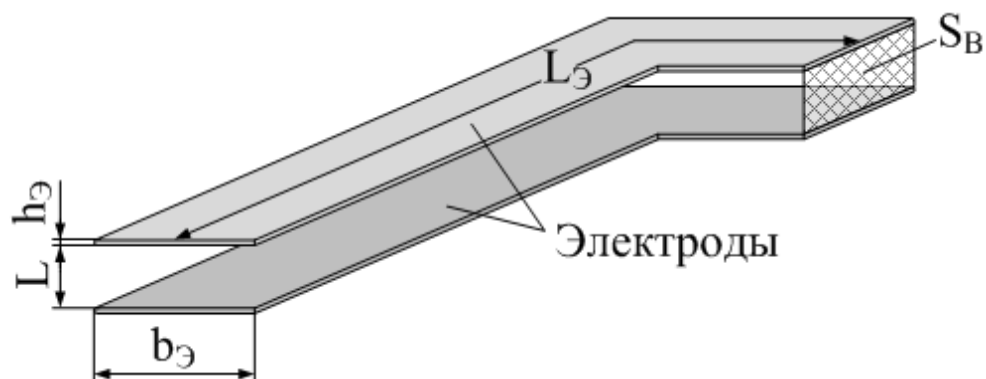


Рисунок 3 - Обозначение геометрические размеров ячейки электроактиватора

При моделировании принимаются следующие допущения:

1. весь поток теплоты от электродов направлен в сторону канала;
2. теплоотдачей свободной конвекцией в канале пренебрегаем;
3. поглощение водой лучистой энергии не учитываем.

С учётом принятых допущений, следует, что охлаждение электродов происходит за счет конвективного теплообмена с водой, пропускаемой через канал электроактиватора. Таким образом, для математического описания тепловых процессов в электроде, можно записать следующее дифференциальное уравнение теплового баланса:

$$m_{\text{Э}} c_{\text{рЭ}} \frac{dt_{\text{Э}}}{d\tau} = \Delta P_{\text{Э}} = P_{\text{ЭП}} - P_{\text{ЭО}} \quad (1)$$

где  $m_{\text{Э}}$  – масса электродов, кг;

$c_{\text{рЭ}}$  – удельная теплоемкость электродов (для стали  $c_{\text{рЭ}} = 470$ ), Дж/(кг·°С);

$t_{\text{Э}}$  – температура электродов, °С;

$\Delta P_{\text{Э}}$  – изменение тепловой мощности, которая идет на повышение температуры  $t_{\text{с}}$ , Вт;

$P_{\text{ЭП}}$  и  $P_{\text{ЭО}}$  – тепловая мощность, соответственно, подводимая и отводимая от электродов, Вт.

Считаем, что вся тепловая энергия выделяется на электродах и составляет 80...90% от потребляемой электрической энергии [4]:

$$P_{ЭП} = P_{ТЕП} = k_{ТЕП} P_{ЭЛ}, \quad (2)$$

где  $P_{ТЕП}$  – тепловая мощность, выделяющаяся в канале разрядного устройства, Вт;

$P_{ЭЛ}$  – электрическая мощность, потребляемая электродами, Вт;

$k_{ТЕП}$  – коэффициент тепловой мощности.

Для нахождения  $P_{ЭЛ}$  всего электроактиватора нами принята схема замещения в которой каждая ячейка представлена параллельным соединением сопротивлений анода, катода, электролита и диафрагмы (рис. 4).

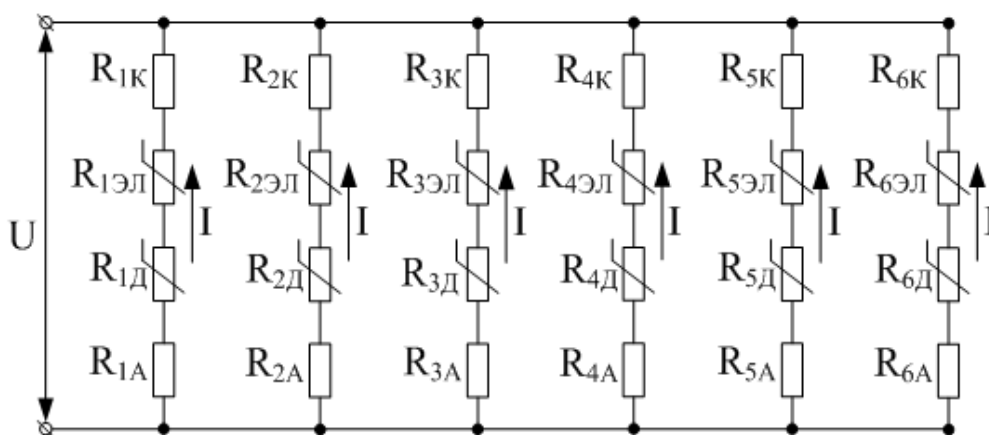


Рисунок 4 – Схема замещения проточного электроактиватора воды

$$P_{ЭЛi} = I \cdot U_{ячi} \quad (3)$$

где  $I$  – ток, А;

$U_{ячi}$  напряжение на  $i$ -ой ячейке, В.

Принимаем, что  $I = const$ . Общее напряжение на ячейке электроактиватора будет равно:

$$U_{ячn} = U_{Кn} + U_{Вn} + U_{Дn} + U_{Аn} \quad (4)$$

где  $U_{Кi}$  – напряжение на катоде  $i$ -ой ячейки, В;

$U_{Bi}$  – напряжение на электролите (в данном случае в качестве электролита используется водопроводная вода)  $i$ -ой ячейки, В;

$U_{di}$  – напряжение на диафрагме  $i$ -ой ячейки, В;

$U_{Ai}$  – напряжение на аноде  $i$ -ой ячейки, В.

Так как в разработанной конструкции электроактиватора, в качестве анода и катода, используются два одинаковых листа стали, то  $U_A = U_K = U_{\text{Э}}$

Как известно падение напряжения в проводниках первого рода определяется по закону Ома. Таким образом, нахождение напряжения на электродах  $U_{\text{Э}}$  не составит труда:

$$U_{\text{Э}} = \frac{\rho_{\text{Э}} \cdot L_{\text{Э}}}{S_{\text{Э1}}} \cdot I \quad (5)$$

где  $\rho_{\text{Э}}$ , - удельное сопротивление электрода, Ом·м;

$L_{\text{Э}}$  - длина электрода, м;

$S_{\text{Э1}}$  - площадь электрода, м<sup>2</sup>.

$$\rho_{\text{Э}} = \rho_{20\text{Э}}(1 + \alpha_{\text{Э}}(t_{\text{Э}} - t_{20})) \quad (6)$$

где  $\rho_{20\text{Э}}$  - удельное сопротивление электрода при определённой температуре (в данном случае при  $t_{\text{Э}} = 20$  °С,  $\rho_{20\text{Э}} = 12 \cdot 10^{-8}$ ), Ом·м;

$\alpha_{\text{Э}}$  - температурный коэффициент электрического сопротивления, который характеризует зависимость электрического сопротивления от температуры (для стали  $\alpha_{\text{Э}} = 0,006$ ), К<sup>-1</sup>;

Подставляя (6) в (5) получаем:

$$U_{\text{Э}} = \frac{\rho_{20\text{Э}}(1 + \alpha_{\text{Э}}(t_{\text{Э}} - t_{20})) \cdot L_{\text{Э}}}{S_{\text{Э1}}} \cdot I \quad (7)$$

Падение напряжения в электролите зависит от плотности, длины пути тока, от его удельного сопротивления. Немаловажную роль играет, также плотность тока в электролите. Если электроды расположены параллельно друг к другу, плоские и имеют одинаковые размеры, то

падение напряжения на электролите может быть определено из формулы [2]:

$$U_{\text{ЭЛ}} = I \cdot \frac{\rho_{\text{В}} L \cdot K_{\text{В}}}{S_{\text{В1}}} \quad (8)$$

где  $\rho_{\text{В}}$  – удельное сопротивление чистого электролита (воды), Ом·м;

$L$  – расстояние между работающими поверхностями электродов, м.

$K_{\text{В}}$  – коэффициент увеличения удельного сопротивления электролита из-за наличия в нем газовых пузырьков;

$S_{\text{В1}}$  – площадь канала ( $S_{\text{В1}} = S_{\text{Э1}}$ ), м<sup>2</sup>.

Удельное сопротивление электролитов снижается с ростом температуры и определяется по формуле:

$$\rho_{\text{В}} = \rho_{20\text{В}} \frac{1}{1 + \alpha_{\text{В}}(t_{\text{В}} - 20)} \quad (9)$$

где  $\alpha_{\text{В}}$  – температурный коэффициент воды ( $\alpha_{\text{В}} = 0,025$ ), К<sup>-1</sup>.

$t_{\text{В}}$  – температура воды, °С;

$\rho_{20\text{В}}$  – удельное сопротивление электролита при определённой температуре (в данном случае  $t_{\text{В}} = 20$  °С).

Подставляя (9) в (8) получаем:

$$U_{\text{ЭЛ}} = I \cdot \frac{\left[ \rho_{20\text{В}} \frac{1}{1 + \alpha_{\text{В}}(t_{\text{В}} - 20)} \right] L \cdot K_{\text{В}}}{S_{\text{В1}}} \quad (10)$$

Очень значительно сопротивление в электролите возрастает при наличии в нем газовых пузырьков, которые образуются на электродах, а также частиц материала, из которого сделана диафрагма. Последнее увеличивает путь движения тока, делая его извилистым.

Влияние газонаполнения на величину сопротивления электролита изучались многими авторами [2]. Выявлено, что газонаполнение электролитов возрастает с увеличением плотности тока, вязкости электролита, высоты электродов, с уменьшением расстояния между

электродами. На рисунке 5 представлена зависимость коэффициента  $K_B$  от газонаполнения электролита.

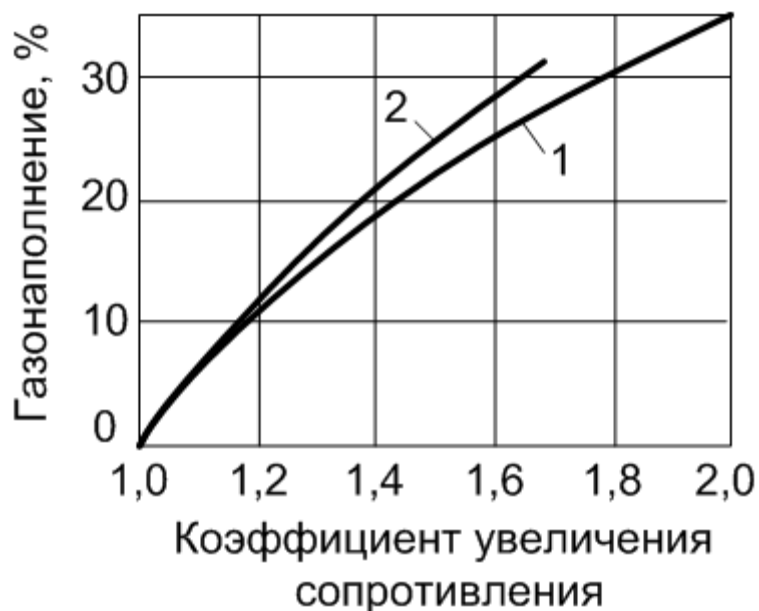


Рисунок 5 - Зависимость коэффициента увеличения сопротивления  $K_B$  от газонаполнения электролита (1-экспериментальные данные; 2-расчетные данные)

В таблице 1 представлены близкие значения коэффициента  $K_B$ :

Таблица 1 – Значения коэффициента  $K_B$ .

Газонаполнение, %	0	15	30	45	60	75
$K_B$	1,0	1,26	1,64	2,23	3,25	5,5

При уменьшении расстояния между электродами или между электродом и диафрагмой и связанного с этим уменьшением общего объема газонаполненного электролита его газонаполнение возрастает. Поэтому с уменьшением расстояния между электродами, сначала наблюдается снижение потерь напряжения на преодоление омического сопротивления газонаполненного электролита. При дальнейшем уменьшении расстояния между электродами потери напряжения в

электролите могут возрасти из-за сильного увеличения газонаполнения и связанного с этим роста удельного сопротивления газонаполненного электролита. С повышением температуры вязкость электролита снижается, что способствует увеличению скорости подъема газовых пузырьков, т.е. уменьшению газонаполнения. Одновременно с ростом температуры увеличивается объем газов, как за счет их расширения, так и вследствие повышения парциального давления паров воды, насыщающих газы. При температуре до 70-80°C газонаполнение мало изменяется с ее ростом, а иногда даже снижается. Выше 70-80°C влияние увеличения объема газов является определяющим и газонаполнение возрастает, особенно при 100-105°C. Величина газонаполнения зависит от скорости подъема газовых пузырьков в электролите. Кроме вязкости на скорость подъема влияют размеры пузырьков газа, отрывающихся от электродов [2].

Диафрагма электроактиватора создает дополнительное сопротивление на пути электрического тока.

Напряжение на диафрагме определяется из следующей формулы:

$$U_d = \rho_v \cdot l_d \cdot K_d \cdot I \quad (11)$$

где  $\rho_v$  – удельное сопротивление электролита заполняющего поры диафрагмы, Ом·м;

$l_d$  – толщина диафрагмы, м;

$K_d$  – коэффициент учитывающий пористость диафрагмы и характер её пор.

Во время работы электроактиватора часть пор диафрагмы может заполняться пузырьками газа. В этом случае коэффициент  $K_d$  возрастает, а значит, возрастает и сопротивление диафрагмы. К увеличению сопротивления диафрагмы также приводит отложение различных осадков, которые забивают её поры.

Подставляя (9) в (11) получаем:



$$U_{\text{д}} = \left[ \rho_{20\text{В}} \frac{1}{1 + \alpha_{\text{В}}(t_{\text{В}} - 20)} \right] \cdot I_{\text{д}} \cdot K_{\text{д}} \cdot I \quad (12)$$

Таким образом, электрическая мощность электроактиватора будет равна:

$$P_{\text{эл}} = I^2 \cdot \left[ 2 \cdot \left( \frac{\rho_{20\text{Э}}(1 + \alpha_{\text{Э}}(t_{\text{Э}} - t_{20})) \cdot L_{\text{Э}}}{S_{\text{Э1}}} \right) + \left( \frac{\left[ \rho_{20\text{В}} \frac{1}{1 + \alpha_{\text{В}}(t_{\text{В}} - 20)} \right] L \cdot K_{\text{В}}}{S_{\text{В1}}} \right) + \left( \left( \rho_{20\text{В}} \frac{1}{1 + \alpha_{\text{В}}(t_{\text{В}} - 20)} \right) \cdot I_{\text{д}} \cdot K_{\text{д}} \right) \right] \quad (13)$$

Отводимый поток теплоты от электродов рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{Э0}} = \beta S_{\text{Э}}(t_{\text{Э}} - t_{\text{В}}), \quad (14)$$

где  $\beta$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$S_{\text{Э}}$  – площадь поверхности электродов, участвующая в конвективном теплообмене, м<sup>2</sup>;

$t_{\text{В}}$  – температура воды, °С.

Используя выражение (14), уравнение (1) можно записать в виде:

$$m_{\text{Э}} c_{\text{рЭ}} \frac{dt_{\text{Э}}}{d\tau} = P_{\text{ЭП}} - \beta S_{\text{Э}}(t_{\text{Э}} - t_{\text{В}}) \quad (15)$$

Разделив переменные в (2.15) получим:

$$\frac{m_{\text{Э}} c_{\text{рЭ}}}{\beta S_{\text{Э}}} \frac{dt_{\text{Э}}}{d\tau} + t_{\text{Э}} = \frac{1}{\beta S_{\text{Э}}} P_{\text{ЭП}} + t_{\text{В}} \quad (16)$$

Для описания тепловых процессов в воде находящейся в канале электроактиватора используем следующее уравнение теплового баланса:

$$m_{\text{В}} c_{\text{рВ}} \frac{dt_{\text{В}}}{d\tau} = P_{\text{ВП}} - P_{\text{ВО}} \quad (17)$$

где  $m_{\text{В}}$  – масса воды в канале, кг;

$c_{\text{рВ}}$  – удельная теплоемкость воды ( $c_{\text{рВ}} = 4183$ ), Дж/(кг·°С);

$t_{\text{В}}$  – температура воды, °С;

$P_{ВП}$  и  $P_{ВО}$  – тепловая мощность, соответственно, подводимая к воде и отводимая вместе с ней, Вт.

Тепловая мощность, отводимая потоком воды в канале определяется по формуле:

$$P_{ВО} = Q_V \rho_V c_{pV} (t_B - t_{В1}) \quad (18)$$

где  $Q_V$  – расчетный расход воды в канале электроактиватора, м<sup>3</sup>/с;

$\rho_V$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$t_{В1}$  – температура воды на входе в электроактиватор, °С.

Расход воды  $Q_V$  может быть выражен через расчетную скорость движения воды в канале:

$$Q_V = v_B S_B \quad (19)$$

где  $v_B$  – расчетная скорость движения воды в канале, м/с;

$S_B$  – площадь сечения канала, м<sup>2</sup>.

Тепловая мощность, подводимая к потоку воды  $P_{ВП}$ , будет равна тепловой мощности отводимой от электродов  $P_{ЭО}$ .

Масса воды находящейся в канале электроактиватора равна:

$$m_B = V_B \rho_V = S_B l \rho_V \quad (20)$$

где  $V_B$  – объем канала, м<sup>3</sup>;

$l$  – длина канала, м.

С учетом выражений (18), (19) и (20) уравнение (17) будет иметь вид:

$$S_B l \rho_V c_{pV} \frac{dt_B}{d\tau} = P_{ЭО} - v_B S_B \rho_V c_{pV} (t_B - t_{В1}) \quad (21)$$

После разделения переменных получим:

$$\frac{S_B l \rho_V c_{pV}}{v_B S_B \rho_V c_{pV}} \frac{dt_B}{d\tau} + t_B = \frac{1}{v_B S_B \rho_V c_{pV}} P_{ЭО} + t_{В1};$$

$$\frac{1}{v_B} \frac{dt_B}{d\tau} + t_B = \frac{1}{v_B S_B \rho_V c_{pV}} P_{ЭО} + t_{В1}. \quad (22)$$

Для определения коэффициента теплоотдачи  $\beta$  конвективного теплообмена между электродом и потоком воды в канале

электроактиватора воспользуемся отдельными положениями теории подобия. Интенсивность процессов конвективного теплообмена при вынужденном движении воды характеризует число Нуссельта  $Nu$ , которое может быть рассчитано по формуле [5]:

$$Nu_B = 1,86(Re \cdot Pr_B)^{0,33} \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^{0,33} \left(\frac{\mu_B}{\mu_{\infty}}\right)^{0,14}, \quad (23)$$

где  $Nu_B$  – число Нуссельта для потока воды в канале разрядного устройства;

$Re_B$  – число Рейнольдса;

$Pr$  – число Прандтля;

$d$  – эквивалентный диаметр трубы, м;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости,  $10^{-3} \cdot \text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$

Тогда коэффициент теплоотдачи может быть определён по формуле:

$$\beta = \frac{Nu_B \cdot \lambda_B}{d}, \quad (24)$$

где  $\lambda_B$  – коэффициент теплопроводности воды,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ .

Число Рейнольдса определяется по формуле:

$$Re_B = \frac{v_{B1} d}{\nu_B} = \frac{Q_{B1} \cdot d}{S_B \nu_B}, \quad (25)$$

где  $v_{B1}$  – скорость воды на входе в канал электроактиватора, м/с;

$\nu_B$  – кинематический коэффициент вязкости воды,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

$Q_{B1}$  – подача воды в канал электроактиватора,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Эквивалентный диаметр трубы:

$$d = \frac{4S_B}{U_B} = \frac{4h_B b_B}{2(h_B + b_B)} = \frac{2h_B b_B}{h_B + b_B}, \quad (26)$$

где  $U_B$ ,  $h_B$  и  $b_B$  – полный периметр, высота и ширина канала электроактиватора соответственно.

Плотность, коэффициент теплопроводности, кинематический и динамический коэффициенты вязкости воды, число Прандтля в значительной степени зависят от температуры воды. Для описания данных функциональных зависимостей в диапазоне температур воды от 0 до 100°C можно использовать общую математическую модель, выражающуюся уравнением следующего вида [3]:

$$y(t_B) = a_1 + a_2(273,15 + t_B)^{a_3}, \quad (27)$$

где  $a_1, a_2, a_3$  – коэффициенты модели.

На основании справочных данных зависимостей  $\rho_B(t_B), \lambda_B(t_B), \nu_B(t_B)$  и  $Pr(t_B)$  для воды при  $t_B=0...100^\circ\text{C}$  с помощью модуля "Нелинейная регрессия" прикладного пакета программ «Statistica» определены коэффициенты модели (27), представленные в таблице 2. Коэффициент детерминации  $R^2$  имел достаточно высокое значение, что говорит о точности аппроксимации модели.

Таблица 2 - Коэффициенты модели для зависимостей  $\rho_B(t_B), \lambda_B(t_B), \nu_B(t_B), Pr(t_B)$  и  $\mu_B(t_B)$  при  $t_B=0...100^\circ\text{C}$ .

Аппроксимируемая функция	Коэффициент			
	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$R^2$
$\rho_B(t_B)$	1009,48585472726	$-6,51592085828735 \cdot 10^{-15}$	6,1847517746884	0,9988
$\lambda_B(t_B)$	-37235,3560392615	37080,8085363033	$0,00097434897312964 \cdot 10^6$	0,9765
$\nu_B(t_B)$	0,234829379291967	$4,69055717716914 \cdot 10^{23}$	-9,63836554039228	0,9996
$Pr(t_B)$	1,47698504163901	$2,35645941479462 \cdot 10^{27}$	-10,790696399995	0,9995
$\mu_B(t_B)$	0,213555329327008	$8,58365365193078 \cdot 10^{22}$	-9,33492699624221	0,9997

Подставим в уравнение (24) значение  $Nu_B$  из выражения (23):

$$Nu_B = 1,86(Re \cdot Pr_B)^{0,33} \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^{0,33} \left(\frac{\mu_B}{\mu_\Theta}\right)^{0,14} = \frac{\beta d}{\lambda_B} \quad (28)$$

Выразим  $\beta$  из (2.28), подставив в него уравнение (25):

$$\beta = \frac{1,86 \cdot \lambda_B (\text{Re} \cdot \text{Pr}_B)^{0,33} \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^{0,33} \left(\frac{\mu_B}{\mu_{\text{Э}}}\right)^{0,14}}{d} \quad (29)$$

Расчетная скорость движения воды, входящая в выражения (22), равна средней алгебраической от скоростей на входе и выходе из канала электроактиватора [3]:

$$v_B = (v_{B1} + v_{B2})/2, \quad (30)$$

где  $v_{B2}$  – скорость воды на выходе из канала электроактиватора, м/с.

Для определения  $v_{B2}$  воспользуемся уравнением неразрывности потока воды в канале электроактиватора:

$$G_B = v_{B1} \rho_{B1} S_B = v_{B2} \rho_{B2} S_B = \text{const} \quad (31)$$

где  $G_B$  – массовый расход воды, кг/с;

$\rho_{B1}$  и  $\rho_{B2}$  – плотность воды при температуре  $t_{B1}$  и  $t_{B2}$  соответственно, кг/м<sup>3</sup>.

Так как:

$$v_{B1} = \frac{Q_B}{S_B} \quad (32)$$

То скорость воды  $v_{B2}$  равна:

$$v_{B2} = v_{B1} \frac{\rho_{B1}}{\rho_{B2}} = \frac{Q_B}{S_B} \frac{\rho_{B1}}{\rho_{B2}}. \quad (33)$$

Площадь поверхности электродов, участвующая в конвективном теплообмене, равна

$$S_{\text{Э}} = 2b_1 l \quad (34)$$

Температура воды  $t_{B2}$  на выходе из канала электроактиватора, определяется следующим образом:

$$t_{B2} = 2t_B - t_{B1} \quad (35)$$

Таким образом, в результате проведенных выше теоретических исследований получили систему из двух дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{m_{\text{Э}} c_{\text{рЭ}}}{\beta S_{\text{Э}}} \frac{dt_{\text{Э}}}{d\tau} + t_{\text{Э}} = \frac{1}{\beta S_{\text{Э}}} P_{\text{ЭП}} + t_{\text{В}} \\ \frac{1}{\nu_{\text{В}}} \frac{dt_{\text{В}}}{d\tau} + t_{\text{В}} = \frac{1}{\nu_{\text{В}} S_{\text{В}} \rho_{\text{В}} c_{\text{рВ}}} P_{\text{ЭО}} + t_{\text{В1}} \end{cases} \quad (36)$$

Подставив значения параметров и решив данную систему уравнений с помощью математического пакета «Mathcad» можно получить данные об изменении значений температуры электродов и воды в ячейке канала электроактиватора, с учётом изменения физических свойств воды с ростом её температуры, во времени.

Канал разработанного электроактиватора воды имеет шесть ячеек, поэтому в данном случае имеем 12 неизвестных ( $t_{\text{Э1}}, t_{\text{Э3}}, t_{\text{Э5}}, t_{\text{Э7}}, t_{\text{Э9}}, t_{\text{Э11}}$  и  $t_{\text{В2}}, t_{\text{В4}}, t_{\text{В6}}, t_{\text{В8}}, t_{\text{В10}}, t_{\text{В12}}$ ), а значит система (36) будет содержать 12 уравнений и в общем виде для  $i$  ячеек будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{m_{\text{Э}} c_{\text{рЭ}}}{\beta S_{\text{Э}}} \frac{dt_{\text{Э}}}{d\tau} + t_{\text{Э}i} = \frac{1}{\beta S_{\text{Э}}} P_{\text{ЭП}} + t_{\text{В}(i+1)} \\ \frac{1}{\nu_{\text{В}}} \frac{dt_{\text{В}}}{d\tau} + t_{\text{В}(i+1)} = \frac{1}{\nu_{\text{В}} S_{\text{В}} \rho_{\text{В}} c_{\text{рВ}}} P_{\text{ЭО}} + t_{\text{В1}} \end{cases} \quad (37)$$

Деление канала на ячейки удобно, тем, что позволяет моделировать различные конструкции электроактиваторов, например, изменять сечение или длину канала, в следствии чего изменяется скорость воды в канале, а значит и её температура.

Алгоритм моделирования представлен блок-схемой на рисунке 6.

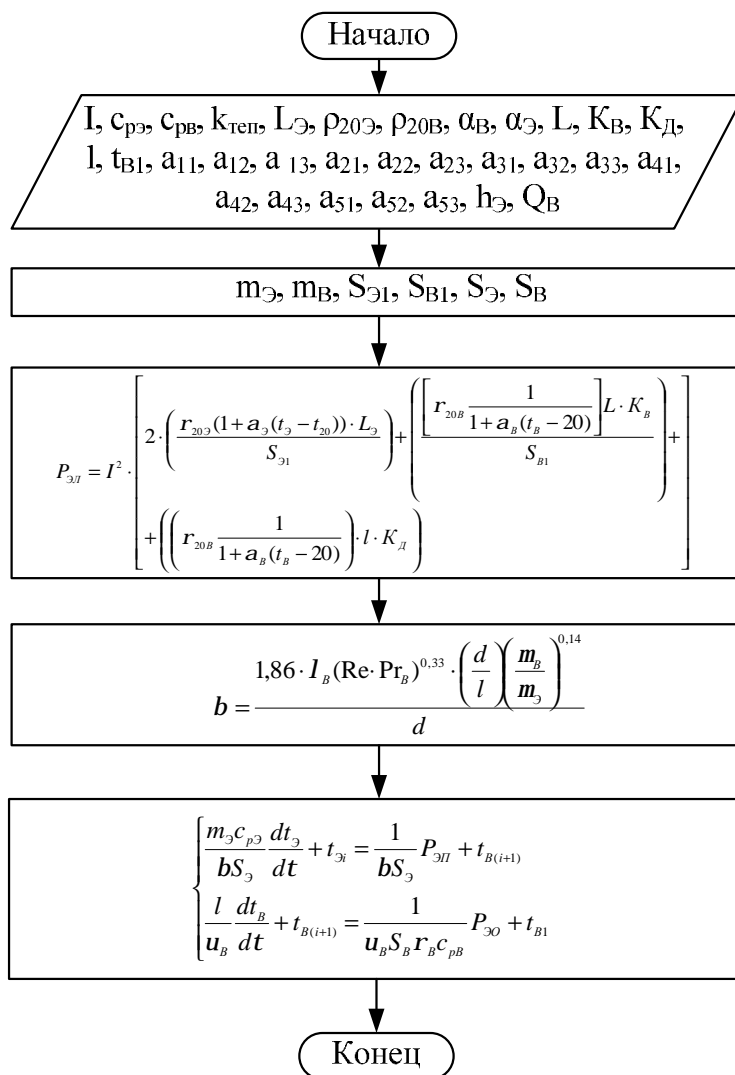


Рисунок 6 - Блок-схема алгоритма моделирования тепловых процессов в проточном электроактиваторе

Наиболее значимым итогом проводимого выше математического описания тепловых процессов в проточном электроактиваторе является получение температуры воды на выходе из каждой ячейки (рис. 7), что при возможности варьирования геометрических, электрических и физических параметров позволяет получить необходимые параметры воды для полива растений (температура, рН).

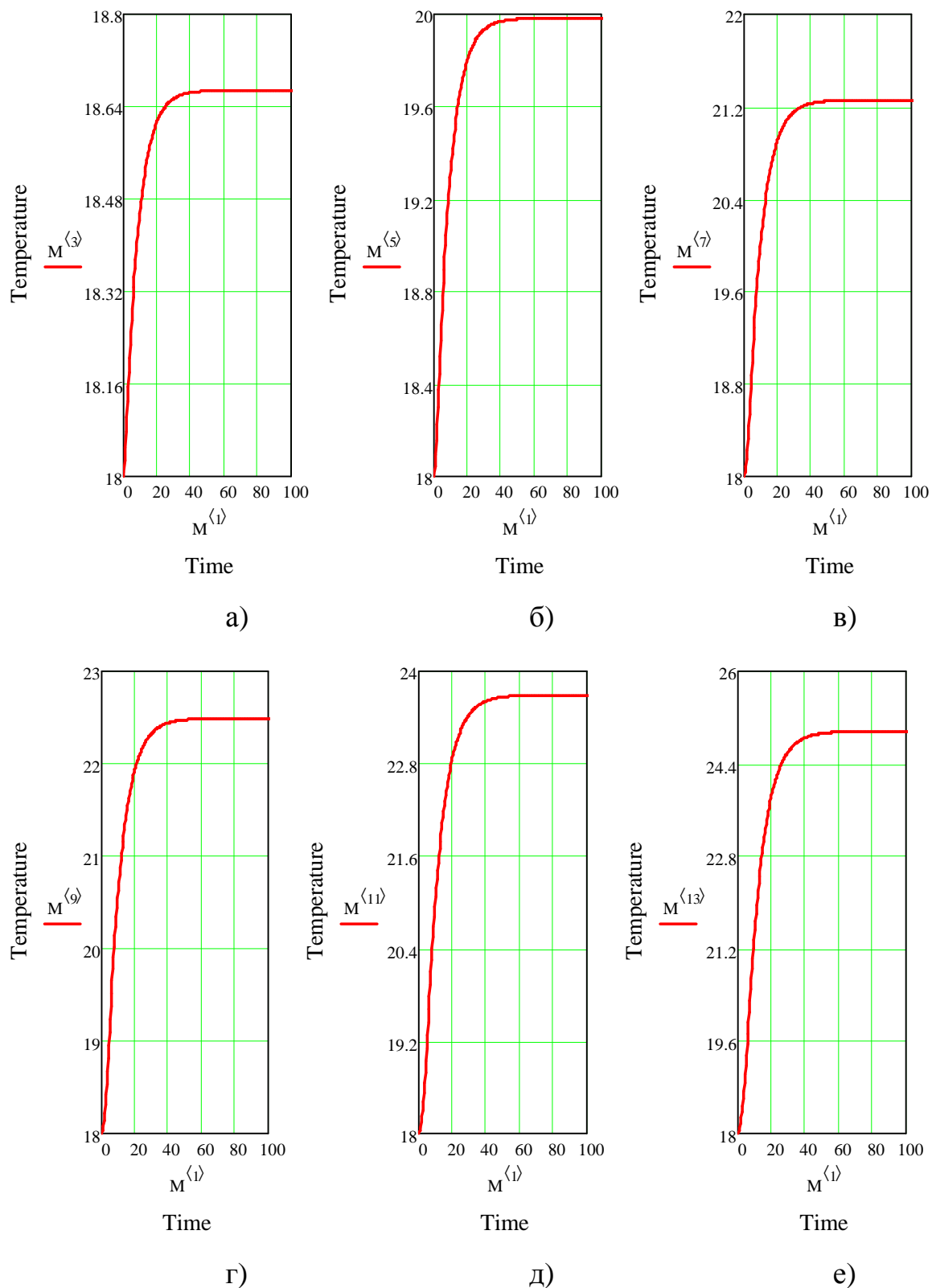


Рисунок 7 - Графики изменения температуры воды во времени в каждой из ячеек электроактиватора при  $I = 14$  А,  $Q_B = 230$  л/ч,  $t_{B1} = 18$  °С: а) 1 ячейка, б) 2 ячейка, в) 3 ячейка, г) 4 ячейка, д) 5 ячейка, е) 6 ячейка



При анализе разработанной математической модели выяснилось, что наибольшее влияние на температуру воды оказывает её расход  $Q_B$  (рис. 8). Поэтому нам представляется наиболее целесообразным регулировать температуру воды путём изменения её расхода.

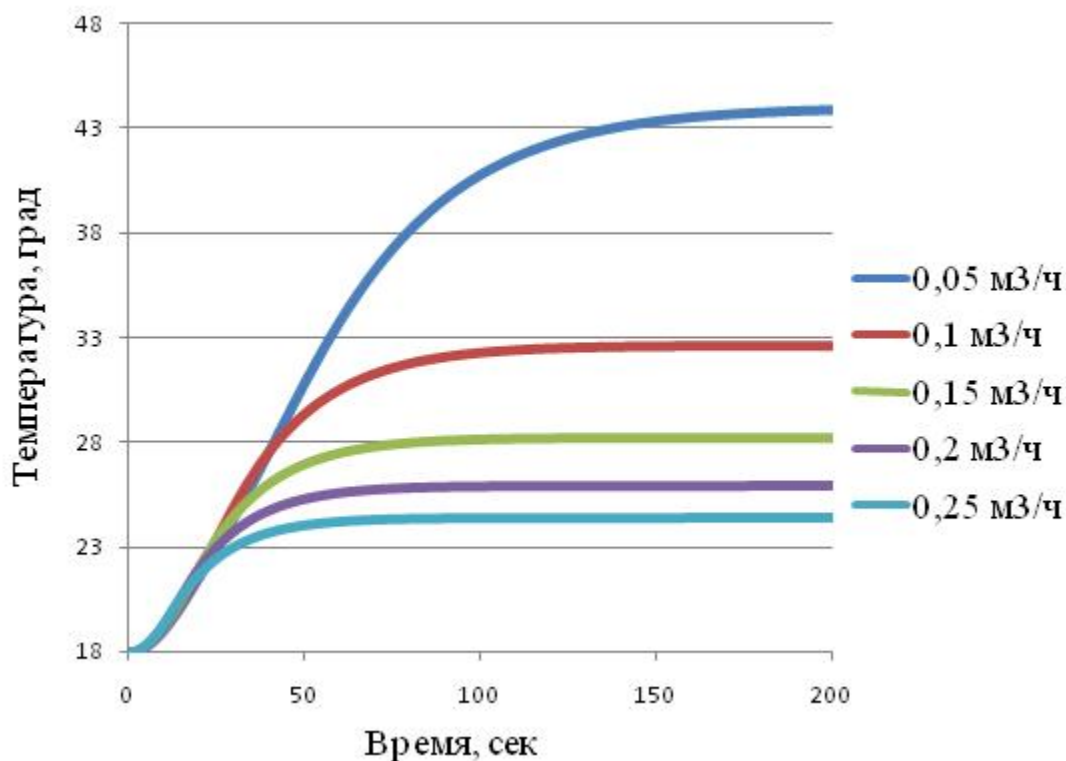


Рисунок 8 - Температура воды на выходе из электроактиватора во времени в зависимости от расхода воды  $Q_B$  при  $I = 14$  А,  $t_{В1} = 18$  °С.

Что же касается рН воды, то данный параметр наиболее сильно зависит от тока  $I$  и определяется по формуле [1]:

$$pH = pH_{нач} \pm \left( -\lg \left( \frac{\eta \cdot I \cdot t}{F \cdot Q_B} \right) \right) \quad (38)$$

где  $pH_{нач}$  - водородный показатель нейтральной воды ( $pH = 7$ );

$\eta$  - выход по току, о.е.;

$t$  - время электроактивации, сек;

$F$  - число Фарадея, ( $F = 96484$  Кл/моль);

В формуле (2.42) знак «+» используется при расчёте рН анолита и знак «-» при расчёте рН католита.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель тепловых процессов в электроактиваторе, которая учитывает не только электрические и тепловые параметры электролита и электродов, но и их геометрические размеры, что даёт возможность проводить моделирование различных конструкций. Наибольшее влияние на температуру воды оказывает её расход  $Q_B$ . Модель позволяет обосновать требуемое значение расхода воды  $Q_B$  для поддержания необходимой температуры воды ( $t_B = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ) на выходе из электроактиватора для полива томатов в условиях закрытого грунта, а также значение необходимого уровня рН воды.

## *Библиографический список*

1. Болтрик О.П. Параметры и режимы работы электроактиватора для предпосевной обработки семян зерновых культур: Дис. . канд. техн. Наук. Зерноград, 1999. 142 с.
2. Л.М. Якименко, И.Д. Модылевская, З.А. Ткачек. Электролиз воды. М.: Химия, 1970, 264 с.
3. Николаенко С.А. Параметры системы стабилизированного электроозонирования ульев при лечении бактериозов пчел: Дисс. ... канд. техн. наук. Краснодар., 2010. 186 с.
4. Оськи А.С. Основы расчета параметров электроактиватора воды / А.С. Оськин // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. - Краснодар: КубГАУ, 2011. - №69(05). - Шифр Информрегистра: 0421100012\0158. - Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2011/05/pdf/20.pdf>
5. Ф. Крейт, У. Блэк Основы теплопередачи. Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 512 с., ил.

## References

1. Boltrik O.P. Parametry i rezhimy raboty jelektroaktivatora dlja predposevnoj obrabotki semjan zernovyh kul'tur: Dis. . kand. tehn. Nauk. Zernograd, 1999. 142 s.
2. L.M. Jakimenko, I.D. Modylevskaja, Z.A. Tkachek. Jelektroliz vody. M.: Himija, 1970, 264 s.
3. Nikolaenko S.A. Parametry sistemy stabilizirovannogo jelektroozonirovanija ul'ev pri lechenii bakteriozov pchel: Diss. ... kand. tehn. nauk. Krasnodar., 2010. 186 s.
4. Os'ki A.S. Osnovy rascheta parametrov jelektroaktivatora vody / A.S. Os'kin // Nauchnyj zhurnal KubGAU [Jelektronnyj resurs]. - Krasnodar: KubGAU, 2011. - №69(05). - <http://ej.kubagro.ru/2013/08/pdf/43.pdf>

Shifr Informregistra: 0421100012\0158. – Rezhim dostupa:  
<http://ej.kubagro.ru/2011/05/pdf/20.pdf>

5. F. Krejt, U. Bljek Osnovy teploperedachi. Per. s angl. — M.: Mir, 1983. — 512 s., il.