

УДК 621.38; 536.331

UDC 621.38; 536.331

**ВЛИЯНИЕ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРООЗОНАТОРА СТЕРИЛИЗУЮЩЕГО СУБСТРАТЫ****INFLUENCE OF RADIANT ENERGY ON THE WORK OF THE ELECTRO-OZONIZER MADE FOR STERILIZING SUBSTRATES**

Шевченко Андрей Андреевич  
доцент, mnpkkgau@mail.ru

Shevchenko Andrey Andreevich  
associate professor, mnpkkgau@mail.ru

Денисенко Евгений Александрович  
ассистент, denisenko\_88@mail.ru

Denisenko Evgeny Aleksandrovich  
assistant, denisenko\_88@mail.ru

Мумро Артем Александрович  
студент, mnpkkgau@mail.ru  
*Кубанский государственный аграрный  
университет, Краснодар, Россия*

Mumro Artem Aleksandrovich  
student, mnpkkgau@mail.ru  
*Kuban state agrarian university, Krasnodar, Russia*

В данной статье представлен тепловой баланс электроозонатора. Так же определена доля лучистой энергии оказывающей влияние на нагрев генератора озона и предложен способ снижения данного влияния

The thermal balance of an electro-ozonizer is presented in this article. As the share of radiant energy having impact on heating of the generator of ozone is defined and the way of decrease in this influence is offered

Ключевые слова: ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС, ЛУЧИСТЫЙ ТЕПЛООБМЕН, КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН, ГЕНЕРАТОР ОЗОНА

Keywords: THERMAL BALANCE, RADIANT HEAT EXCHANGE, CONVECTIVE HEAT EXCHANGE, OZONE GENERATOR

Так как производство биодобавок носит непрерывный характер, необходима непрерывная длительная работа электроозонатора. Но у выбранного нами пластинчатого озонатора имеется недостаток, он заключается в том, что при нагревании разрядного блока диэлектрические пластины изменяют свою структуру и выходят из строя. Таким образом, перед нами ставится задача, увеличения срока непрерывной работы генератора озона[1].

Для достижения поставленной цели нами предлагается рассмотреть баланс мощностей электроозонатора, и выявить пути снижения энергий затрачиваемых на нагрев диэлектрика. Для этого составим энергетическую диаграмму пластинчатого электроозонатора (рисунок 1).

Из представленной диаграммы видно, что подводимая к генератору озона энергия расходуется на: энергию образования озоновоздушной смеси -  $P_{oo}$ ; энергия, направленная на нагрев системы -  $P_{сист}$ ; энергию

конвективного теплообмена -  $P_k$ ; лучистую энергию испускаемую стримерами в процессе работы электроозонатора-  $P_{луч}$ .

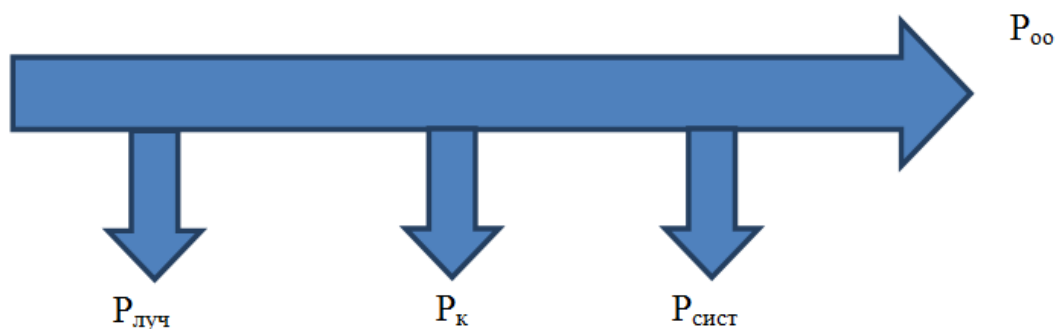


Рисунок 1 – Баланс мощностей электроозонатора

На основании вышесказанного запишем баланс мощностей электроозонатора в виде формулы:

(1)

где  $P_{oo}$  – мощность, необходимая на образование озона;

$P_{сист}$  – мощность на нагревание системы;

$P_k$  – мощность на конвективный теплообмен;

$P_{луч}$  – мощность на лучистый теплообмен;

На основании представленного баланса выдвинуто предположение, что уменьшить нагрев электроозонатора можно исключив энергию лучистого теплообмена [2]. На наш взгляд этого можно добиться при использовании лучепрозрачного корпуса электроозонатора, что позволит выносить тепловую энергию лучистой энергии за пределы системы [4]. Для подтверждения данной теории рассмотрим баланс мощностей электроозонатора в непрозрачном корпусе.

Баланс мощностей будет иметь вид:

(2)

Соответственно в непрозрачном корпусе будет отсутствовать мощность, необходимая на лучистый теплообмен. Внесем данные изменения в диаграмму баланса мощностей и представим и представим ее внешний вид на рисунке 2.

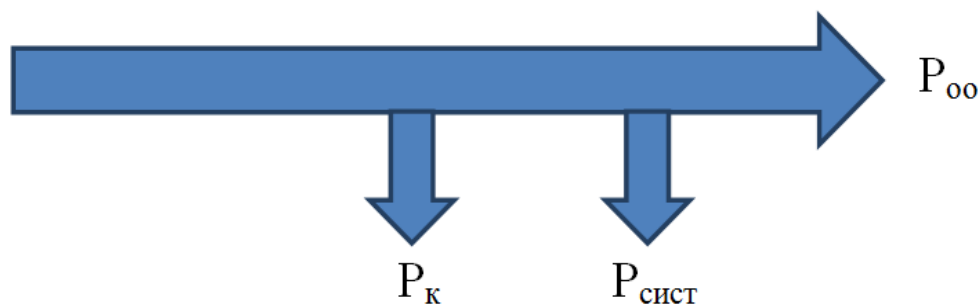


Рисунок 2 – Баланс мощностей электроозонатора в непрозрачном корпусе

Так как электроозонатор выходит из строя, из-за нагревания диэлектрика рассмотрим, как будут распределяться температура в электроозонаторе с прозрачным и черным корпусом. Для этого составим температурный баланс в электроозонаторе [3].

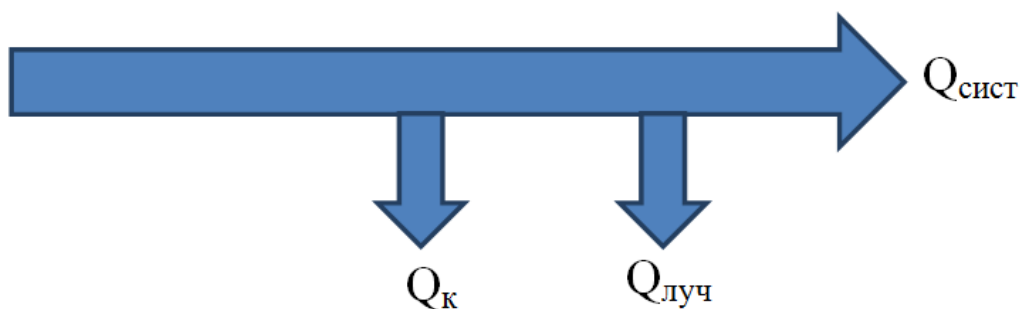


Рисунок 3 – Баланс количества теплоты в электроозонаторе с прозрачным корпусом

Баланс количества теплоты в электроозонаторе с прозрачным корпусом будет иметь вид:

(3)

где  $Q$  – общее количество теплоты;

$Q_{сист}$  – количество теплоты, необходимое для нагревания системы;

$Q_{луч}$  – количество теплоты, необходимое на лучистый теплообмен;

$Q_k$  – количество теплоты, необходимое на конвективный теплообмен.

Аналогично составим баланс мощностей для электроозонатора с черным корпусом:

(4)

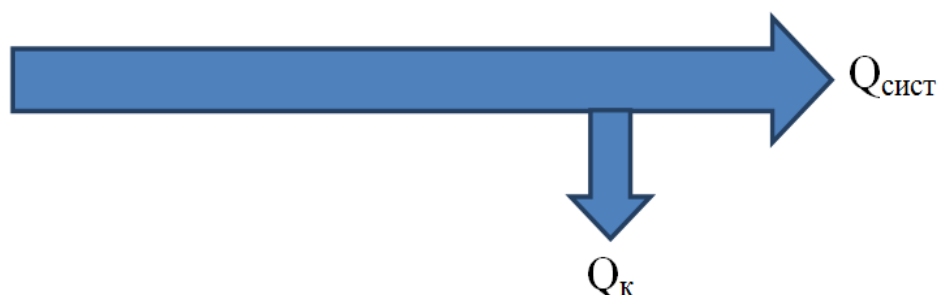


Рисунок 4 – Баланс количества теплоты в электроозонаторе с черными стенками

Для того чтобы определить количество теплоты переданное на нагревание системы будем пользоваться формулой:

(5)

где  $m$  – масса стекла, кг;

$c=0,84$  – средняя объемная теплоемкость стекла, кДж/кг·К

$t_{кст}$  – температура конечная стекла, К;

$t_{нст}$  – температура начальная стекла, К;

Зная геометрические размеры стекла, можно определить его массу:

$$m = a \cdot b \cdot h \cdot n \cdot \rho \quad (6)$$

где  $a$  – длина стекла, м;

$b$  – ширина стекла, м;

$h$  – толщина стекла, м;

$n$  – количество пластин, шт

$\rho$  – плотность стекла, кг/м<sup>3</sup>.

Подставив формулу (6) в (5) получим выражение:

(7)

Количество теплоты, переданное от поверхности стекла воздуха можно определить по формуле:

(8)

где  $L$  – подача воздуха, м<sup>3</sup>/ч;

$c_0=5,67$  – коэффициент излучения черного тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$\rho_n = \frac{353}{273 + t_0}$  – плотность наружного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$t_{\text{выхвозд}}$  – температура воздуха на выходе из озонатора, °С ;

$t_{\text{начвозд}}$  – температура воздуха на входе в озонатор, °С .

Количество теплоты, переданное нагретым стеклом в окружающую среду определим:

(9)

где  $\varepsilon = 0,92$  – степень черноты поверхности стекла;

$T_c$  и  $T_e$  – абсолютные температуры поверхности пластин озонатора и температуры окружающих предметов, К;

$F$  – теплоотдающая поверхность, м<sup>2</sup>

Но для того чтобы определить эти данные, необходимо знать характеристику процесса нагрева.

Процессы нагрева электротермических установок, их отдельных элементов, а также нагреваемых материалов являются динамическими. Рассмотрим процесс изменения температуры электротермической установки или нагреваемого материала во времени. Для простоты допустим, что:

1) электротермическая установка или нагреваемый материал представляют собой однородные тела и обладают бесконечно большой теплопроводностью, поэтому температура во всех их точках одинакова; тепловой поток в окружающую среду пропорционален разности температур электротермической установки  $t_{\text{эту}}$  или материалов  $t_{\text{м}}$  и окружающей среды  $t_{\text{окр}}$  (т.е. превышению температуры  $t: t = t_{\text{эту}} - t_{\text{окр}} = t_{\text{м}} - t_{\text{окр}}$ );

2) теплоёмкость  $c$ , теплоотдача  $\alpha F$  и мощность  $P$  электротермической установки или материала от температуры не зависят;

3) температура окружающей среды в процессе разогрева не изменяется.

Дифференциальное уравнение теплового баланса за время  $dt$  имеет вид:

$$P \cdot dt = c \cdot d\tau + \alpha \cdot F \cdot \tau \cdot dt, \quad (10)$$

где  $P \cdot dt$  – подводимая тепловая энергия или теплота, выделяющаяся в нагревателе установки;

$c \cdot d\tau$  – часть теплоты, выделяющаяся в материале (и идущая на повышение его температуры) или запасаемая в элементах электротермической установки;

$\alpha \cdot F \cdot \tau \cdot dt$  – часть теплоты, рассеиваемая в окружающую среду.

Основываясь на уравнении (10) составим дифференциальное уравнение теплового баланса за время  $dt$  для электроозонатора пластинчатого типа. Так как материал блока генератора озона неоднородный, а состоит из металла (электрод) и диэлектрика, то часть

теплоты, выделяющаяся в материале или запасаемая в элементах электротермической установки будет определяться:

$$c \cdot dt = c_1 \cdot dt + c_2 \cdot dt \quad (11)$$

где  $c_1$  и  $c_2$  - удельные теплоемкости металла и диэлектрика соответственно.

Так как металл и диэлектрик находятся в плотном соприкосновении друг с другом, то удельное сопротивление всей конструкции можно определить исходя из объемных долей каждого компонента. Тогда выражение (11) примет вид:

$$c dt = (g_1 \cdot c_1 + g_2 \cdot c_2) \cdot dt \quad (12)$$

где  $g_1$  и  $g_2$  – объемные доли металла и диэлектрика соответственно;

Часть теплоты, рассеиваемая в окружающую среду для электроозонатора примет вид:

$$(13)$$

Тогда дифференциальное уравнение для генерирующего блока генератора озона пластинчатого типа примет вид:

$$(14)$$

Для расчета дифференциального уравнения определим изменение температуры генерирующего блока с учетом объемных долей материалов, лучистого и конвективного теплообменов:

$$(15)$$

Время нагрева  $t$  – один из параметров, определяющий режим нагрева материала или электротермической установки.

Проинтегрировав выражение (15) и определив постоянную интегрирования из нулевых начальных условий получим, что время нагрева равно:

(16)

Величина постоянной интегрирования  $T$  называется постоянной времени нагрева и может быть определена как:

$$T = \frac{(g_1 c_1 + g_2 c_2)}{\alpha \cdot F} = \frac{c_M \cdot M}{\alpha \cdot F}, \quad (17)$$

Тогда выражение (12) примет вид:

$$\tau = T \cdot \frac{\ln P}{P - Q_{\text{луч}} - Q_{\text{конв}}}, \quad (18)$$

Превышение температуры нагрева при условии, что разогрев идёт из холодного состояния, определяется по формуле:

(19)

При  $t = \infty$  превышение температуры принимает установившиеся значение:

(20)

Практически же установившийся режим наступает при  $t = (4...5)T$ .

Если разогрев идёт не из холодного состояния, то формула (19), с учётом этого обстоятельства, примет вид:

(21)

где  $\tau_0$  – начальная температура, °С.

Нетрудно показать, что при  $t = T$  превышение температуры равно:

(22)

На основании выражения (22) постоянную времени нагрева  $T$  можно определить как промежуток времени, за который превышение температуры достигает значения  $0,63 \cdot \tau_{уст}$ .



Произведем построение временных характеристик процесса нагрева для 3 блоков генератора озона с мощностями  $P_1=22$  Вт,  $P_2=39$  Вт и  $P_3=58$  Вт.

Посчитанные данные теплоемкости конструкции блока генератора озона  $c=0,24$ Вт·ч/кг·К, коэффициент теплоотдачи  $\alpha=5,8$  Вт/м<sup>3</sup>·К и площадь нагреваемой поверхности  $F$  по выражению (17) определим постоянную времени нагрева для блока генератора озона с мощностью  $P=22$  Вт:

$$T = \frac{0,24}{5,8 \cdot 0,08472} = 0,49 \text{ ч}$$

Так как разогрев генератора озона идет не из холодного состояния, а от состояния температуры окружающей среды (возьмем комнатную температуру 25 °С), то для нахождения температуры нагрева будем использовать выражение (21). Изменение времени  $\tau$  примем 20 мин, а полное время нагрева примем 2 часа. Результаты расчетов сведем в таблицу 1.

Таблица 1 – Расчетные данные температуры нагрева для блока генератора озона с мощностью  $P_1=22$  Вт.

Время нагрева $\tau$ , мин	Температура нагрева $t$ , °С
0	25
20	34,7
40	39,6
60	42,2
80	43,5
100	44,1
120	44,4

Полученные данные позволяют оценить характер нагрева диэлектрических барьеров с течением времени. Так за первые 20 минут работы генератора озона рост температуры составляет  $9,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Дальнейшее увеличение температуры диэлектрических барьеров идет более низкими темпами и следующее 20 минутное приращение времени приводит к росту температуры  $4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При дальнейшей работе генератора озона происходит постепенное снижение прироста температуры и при времени 120 минут с начала работы генератора озона наступает режим насыщения температурного прироста, где изменение температуры по сравнению с предыдущим измеряемым значением составляет  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

По полученным данным построим временную характеристику процесса нагрева (рисунок 5).

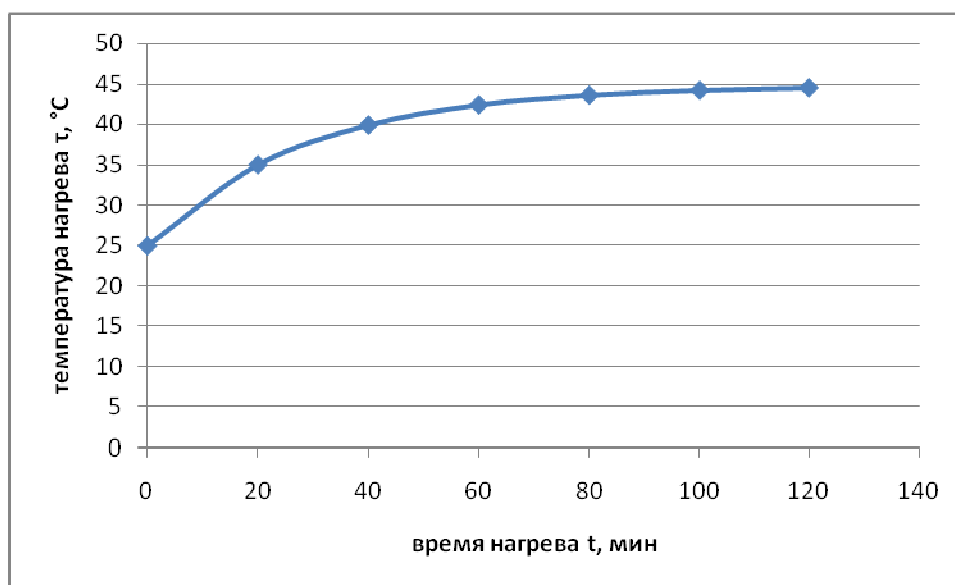


Рисунок 5 – Характер изменения температуры во времени при нагреве для блока генератора озона мощностью 22 Вт

Аналогичным образом зная характер изменения температуры во времени при нагреве, по выражениям (7) и (9) определим количество теплоты, переданное нагретым стеклом в окружающую среду  $Q_{\text{луч}}$  и

количество теплоты необходимое для нагревания системы  $Q_{сист}$ . Данные расчетов сведем в таблицу 2.

Полученные данные показали, что энергия, затрачиваемая на лучистый теплообмен, составляет около 50 % от всей энергии расходуемой на нагрев электроозонатора. Помимо этого установлено, что тенденция изменения количества теплоты переданной от генерирующего блока в окружающую среду схожа с тенденцией изменения температуры генерирующего блока электроозонатора. Режим насыщения при изменении энергии лучистого теплообмена и изменения энергии на нагрев системы наступает через 2 часа работы генератора озона, что подтверждает выход в стационарный режим работы озонатора.

Таблица 2- Расчетные данные изменения теплоты выделенной озонатором с мощностью разрядного устройства  $P=22$  Вт

Время нагрева $\tau$ , мин	$Q_{луч}$ , Дж	$Q_{сист}$ , Дж
0	0	0
20	4,67	5,06
40	7,25	7,67
60	8,68	9,05
80	9,4	9,74
100	9,74	10,06
120	9,91	10,22

Аналогичным образом рассмотрим изменение температуры и энергий, расходуемых на нагрев электроозонатора мощностью 39 Вт, для этого определим постоянную времени нагрева для блока генератора озона с соответствующей мощностью:

$$T = \frac{0,24}{5,8 \cdot 0,10132} = 0,41 \text{ ч}$$

Изменение времени  $\tau$  примем 20 мин, а полное время нагрева примем 2 часа. Результаты расчетов сведем в таблицу 3.

Анализ полученных данных в таблицах 1 и 3 показывают аналогичный характер изменения температуры. Основной прирост, которой наблюдается при первых 20 минутах работы электроозонатора. Но необходимо отметить, что увеличение мощность электроозонатора приводит к ускорению процесса нагрева диэлектрических пластин. Так за первые 20 минут работы диэлектрические пластины разогреваются до 47,87 °С, что на 14,17°С больше, чем у электроозонатора обладающего мощностью 22 Вт. Но не смотря на более высокие темпы роста температуры генерирующий блок выходит в стационарный режим так же за 120 минут и его максимальная температура при этом составляет 66,05 °С.

Таблица 3 – Расчетные данные температуры нагрева для блока генератора озона с мощностью  $P_2=39$  Вт

Время нагрева $\tau$ , мин	Температура нагрева $t$ , °С
0	25
20	47,87
40	58,1
60	62,76
80	64,75
100	65,64
120	66,05

По полученным данным построим временную характеристику процесса нагрева (рисунок 6).

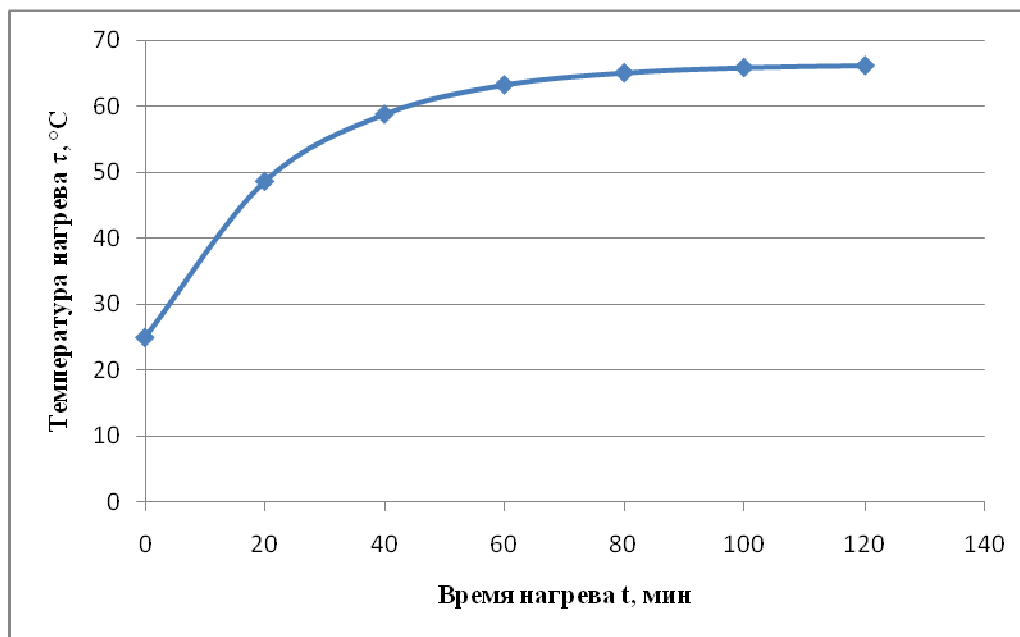


Рисунок 6 - Характер изменения температуры во времени при нагреве для блока генератора озона с мощностью  $P_2=39$  Вт

Зная характер изменения температуры во времени при нагреве по выражениям (7) и (9) определим количество теплоты, переданное нагретым стеклом в окружающую среду  $Q_{луч}$  и количество теплоты необходимое для нагревания системы  $Q_{сист}$ . Данные расчетов сведем в таблицу 4:

Таблица 4 - Расчетные данные изменения теплоты выделенной озонатором с мощностью  $P_2=39$  Вт при его работе

Время нагрева $\tau$ , мин	$Q_{\text{луч}}$ , Дж	$Q_{\text{сист}}$ , Дж
0	0	0
20	14,34	14,95
40	21,81	21,64
60	25,49	24,69
80	27,1	25,99
100	27,83	26,57
120	28,16	26,84

Наблюдаемое изменение величин представленных в таблице 4 соответствует характеру изменения данных представленных в таблице 2. Увеличение мощности генератора озона на 17 Вт приводит к увеличению энергий расходуемых на лучистый теплообмен и нагрев системы в стабилизированном режиме работы на 18,25 и 16,62 Дж соответственно.

Рассмотрим изменение параметров генерирующего блока мощностью 58 Вт, для этого определим соответствующую постоянную времени нагрева:

$$T = \frac{0,24}{5,8 \cdot 0,12} = 0,34 \text{ ч}$$

На основании расчета постоянной времени нагрева принимаем изменение времени  $\tau$ -20 мин, а полное время нагрева - 2 часа. Результаты расчетов сведем в таблицу 5.

Таблица 5 – Расчетные данные температуры нагрева для блока генератора озона с мощностью  $P_3=58$  Вт

Время нагрева $\tau$ , мин	Температура нагрева $t$ , °C
0	25
20	61,23
40	74,96
60	80,25
80	82,17
100	82,89
120	83,17

По полученным данным построим временную характеристику процесса нагрева (рисунок 7).

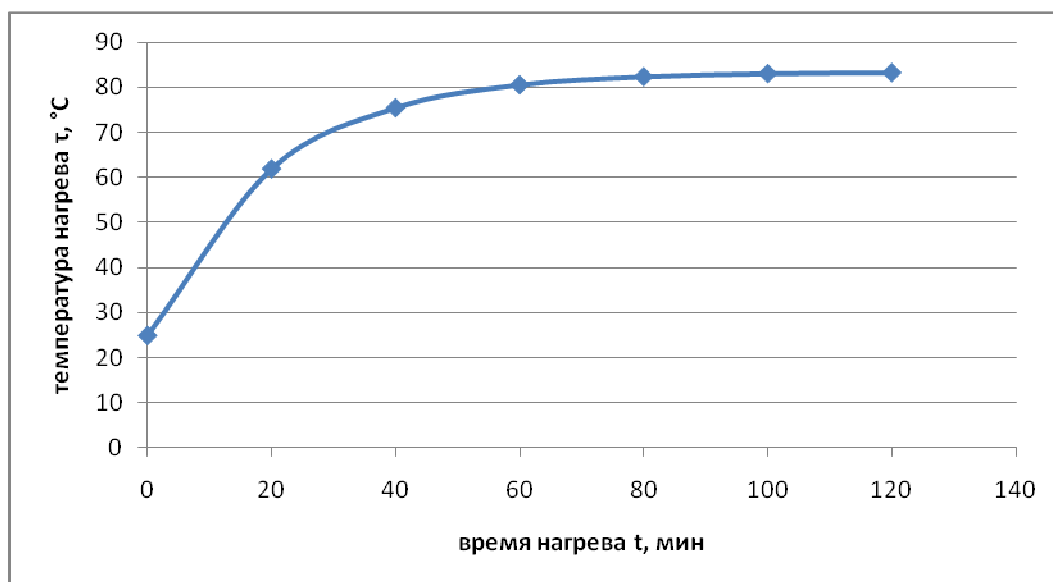


Рисунок 7 - Характер изменения температуры во времени при нагреве для блока генератора озона с мощностью  $P_3=58$  Вт

По полученным данным рассчитаем количество теплоты, переданное нагретым стеклом в окружающую среду  $Q_{луч}$  и количество теплоты необходимое для нагревания системы  $Q_{сист}$ . Данные расчетов сведем в таблицу 6:

Таблица 6 - Расчетные данные изменения теплоты выделенной озонатором с мощностью  $P_3=58$  Вт при его работе

Время нагрева $\tau$ , мин	$Q_{луч}$ , Дж	$Q_{сист}$ , Дж
0	0	0
20	28,75	28,77
40	42,4	39,67
60	48,11	43,87
80	50,24	45,39
100	51,05	45,96
120	51,37	46,19

Проанализировав данные полученные в результате теоретического исследования и сведенные в таблицы 1-6, можно сказать, что увеличение мощности генератора озона приводит к увеличению, как температуры диэлектрических барьеров разрядного промежутка, так и энергий расходуемых на лучистый теплообмен и нагрев системы. При этом увеличение мощности примерно в 2 раза приводит к такому же увеличению искомых параметров.

По полученным данным построим характеристики изменения энергии лучистого теплообмена (рисунок 8) и энергии затраченной на нагрев системы (рисунок 9.).

Анализ полученных зависимостей показывает, что для всех трех вариантов исследованных электроозонаторов энергия затрачиваемая на



лучистый теплообмен близка по значению к энергии затраченной на нагрев системы, следовательно, решение вопроса удаления тепловой энергии полученной в результате лучистого теплообмена позволит снизить нагрев диэлектрических пластин электроозонатора, что позволит увеличить срок его безотказной работы.

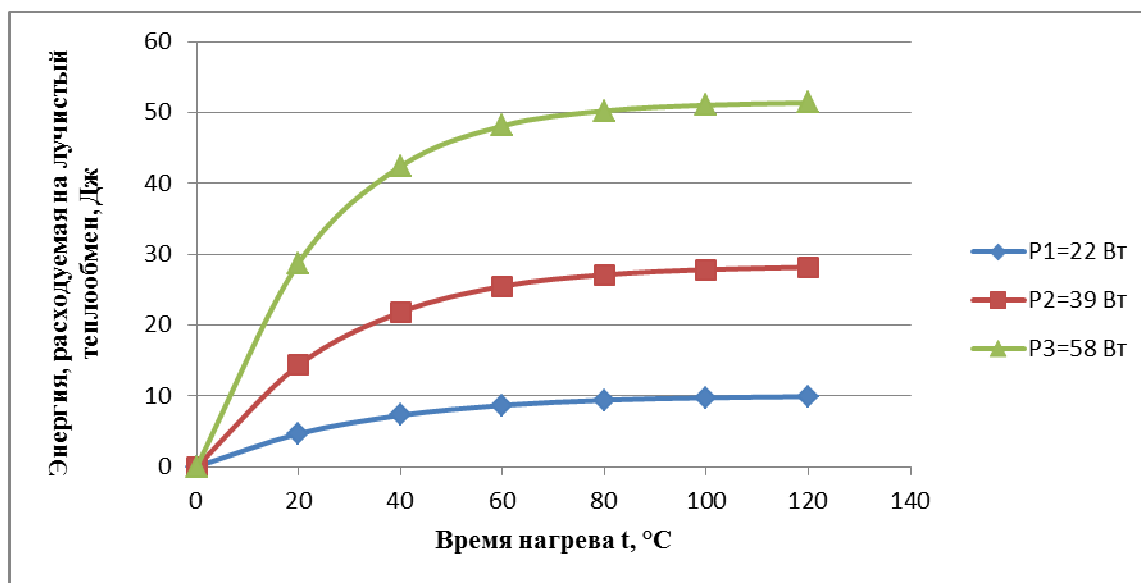


Рисунок 8 – Характеристика изменения энергии, расходуемой на лучистый теплообмен блоков генераторов озона различной мощности

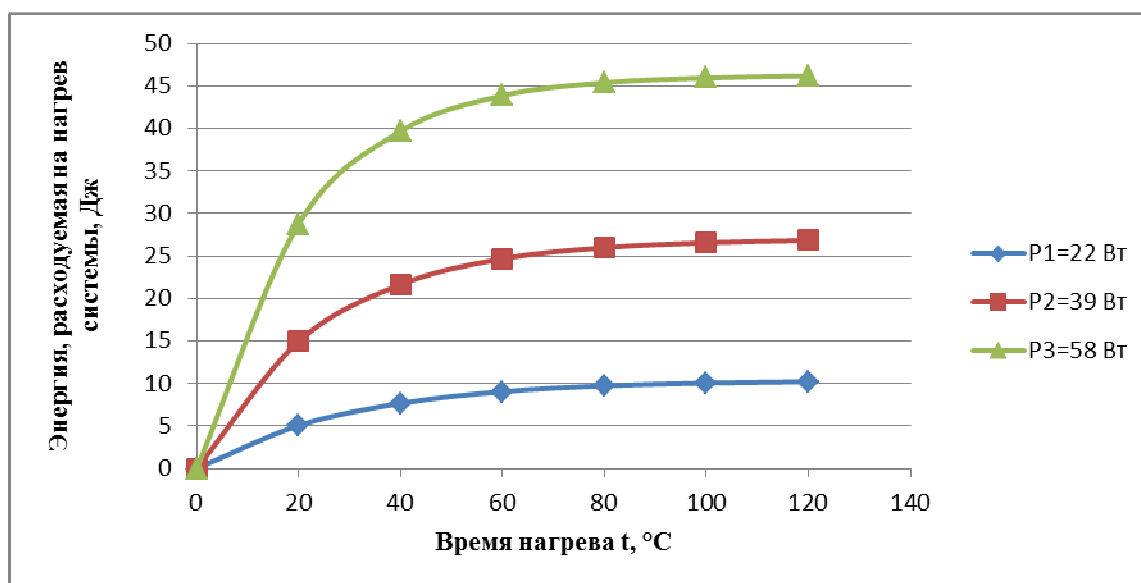


Рисунок 9 – Характеристика изменения энергии, расходуемой на нагрев системы блоков генераторов озона различной мощности

Так же необходимо отметить, что энергия, затрачиваемая на нагрев системы, содержит в своем расчетном значении и величину энергии затрачиваемой на конвективный теплообмен. Следовательно, полученные данные позволяют определить количество теплоты, выделенное озонатором без учета конвективного теплообмена. Для составления полного теплового баланса озонатора необходимо провести лабораторные исследования процесса нагрева, с целью получения недостающих данных ( $t_{\text{выхвоз}}$  – температуры выходного воздуха из корпуса).

Исходя из проведенного исследования, можно сказать, что в генераторе озона значительная часть энергии идет на лучистый теплообмен, что в свою очередь влияет на нагрев генератора озона. Удалить влияние тепловой энергии лучистого теплообмена на нагрев генератора озона, по нашему мнению, можно за счет изготовления прозрачного корпуса. Это позволит осуществлять вынос тепла с поверхности генерирующего блока в окружающую среду.

#### Литература

1. Нормов Д.А. Обеззараживание зерна озонированием / Д.А. Нормов, А.А. Шевченко, Е.А. Федоренко // Комбикорма – М.: Фолиум, 2009. - № 4. - С. 44.
2. Нормов Д.А., Оськин С.В., Шевченко А.А., Сапрунова Е.А. Способ предпосевной обработки с.х. культур / Патент на изобретение RUS2248111. 20.03.05
3. Нормов Д.А. Озон против микотоксикозов фуражного зерна / Д.А. Нормов, А.А. Шевченко, Е.А. Федоренко // Сельский механизатор. – М.: 2009. - № 4. - С. 24-25.
4. Шевченко А.А. Дезинфекция субстратов озонозоонозной смесью перед приготовлением биопрепаратов / А.А. Шевченко, Е.А. Денисенко // Научное обозрение. – Саратов: ООО «АПЕКС-94», 2013. - №1. –С. 102-107

#### References

1. Normov D.A. Obezzarazhivanie zerna ozonirovaniem / D.A. Normov, A.A. Shevchenko, E.A. Fedorenko // Kombikorma – M.: Folium, 2009. - № 4. - S. 44.
2. Normov D.A., Os'kin S.V., Shevchenko A.A., Saprunova E.A. Sposob predposevnoj obrabotki s.h. kul'tur / Patent na izobretenie RUS2248111. 20.03.05
3. Normov D.A. Ozon protiv mikotoksikozov furazhnogo zerna / D.A. Normov, A.A. Shevchenko, E.A. Fedorenko // Sel'skij mehanizator. – M.: 2009. - № 4. - S. 24-25.

4. Shevchenko A.A. Dezinfekcija substratov ozonovozdushnoj smes'ju pred prigotovleniem biopreparatov / A.A. Shevchenko, E.A. Denisenko // Nauchnoe obozrenie. – Saratov: OOO «APEKS-94», 2013. - №1. –S. 102-107