

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-37-43>
УДК 536.2;532.516;663.033



Оригинальная статья

М. В. Янко¹, А. Д. Чорный^{2*}, Е. М. Заяц¹

¹Белорусский государственный аграрный технический университет,
пр. Независимости, 99, 220012, Минск, Республика Беларусь

²Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь

**К РАСЧЕТУ ЗАРЯДКИ КАПЕЛЬ ПРИ КОРОННОМ РАЗРЯДЕ
В КАМЕРЕ АЭРОИОННОЙ ОБРАБОТКИ ОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Аннотация. Представлена в дрейфово-диффузионном приближении математическая модель, которая описывает перенос заряженных частиц в воздухе при действии коронного разряда, а также изменение поверхностного заряда капель в капельно-воздушной среде. Данная модель позволяет рассчитать динамику сообщения заряда каплям органических материалов при их аэроионной обработке с учетом неоднородности электрического поля коронного разряда. Неоднородное электрическое поле создается при приложении электрического напряжения между электродами типа игла и внутренней поверхностью камеры аэроионной обработки органических материалов. Экспериментально показано, что электрический заряд молекул питательной среды и дрожжевой клетки в капле влияет на диффузию питательных веществ внутрь клетки и, как следствие, на развитие и продуктивность дрожжей, которая увеличивается на 12–17 % по сравнению с применением способов, не связанных с аэроионной обработкой органических материалов. Проведенные экспериментальные исследования указывают на возможность применения модели для проектирования реальных камер аэроионной обработки с целью оптимизации их работы.

Ключевые слова: коронный разряд, заряд капли, аэроионная активация, дрейфово-диффузионное приближение

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Янко Максим Валерьевич – магистр технических наук, старший преподаватель Белорусского государственного аграрного технического университета. <https://orcid.org/0000-0002-4723-4029>. E-mail: umv.pps@bsatu.by; Чорный Андрей Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0003-4716-6123>. E-mail: anchor@hmti.ac.by; Заяц Евгений Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор Белорусского государственного аграрного технического университета. <https://orcid.org/0000-0002-3431-7925>. E-mail: zayatsem@mail.ru

Вклад авторов: Янко Максим Валерьевич – проведение экспериментальных исследований, интерпретация данных, формулировка выводов, написание и оформление текста; Чорный Андрей Дмитриевич – постановка и проведение расчетов, обсуждение результатов и выводов, редактирование текста; Заяц Евгений Михайлович – постановка исследовательских целей и задач, анализ результатов, написание текста статьи.

Для цитирования: Янко, М. В. К расчету зарядки капель при коронном разряде в камере аэроионной обработки органических материалов / М. В. Янко, А. Д. Чорный, Е. М. Заяц // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 1. – С. 37–43. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-37-43>

Поступила в редакцию: 30.01.2025

Доработанный вариант: 27.02.2025

Утверждена к публикации: 06.03.2025

Подписана в печать: 12.03.2025

Original articleMaxim V. Yanko¹, Andrei D. Chorny^{2*}, Yauheni M. Zayats¹¹Belarusian State Agrarian Technical University,
99, Nezavisimosti Ave., 220012, Minsk, Republic of Belarus²A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus,
15, P. Brovka St., 220072, Minsk, Republic of Belarus**ON THE CALCULATION OF DROPLET CHARGING DURING CORONA DISCHARGE
IN THE CHAMBER OF AIR IONIC TREATMENT OF ORGANIC MATERIALS**

Abstract. A mathematical model is presented in the drift-diffusion approximation, which describes the transport of charged particles in the air under the action of a corona discharge, as well as a change in the surface charge of droplets in a droplet-air environment. This model allows us to calculate the dynamics of charge transmission to droplets of organic materials during their aeroion treatment, taking into account the heterogeneity of the electric field of the corona discharge. An inhomogeneous electric field is created when an electric voltage is applied between needle-type electrodes and the inner surface of the chamber for aeroion treatment of organic materials. It has been experimentally shown that the electric charge of nutrient medium and yeast cell molecules in a drop affects the diffusion of nutrients into the cell and, as a result, the development and productivity of yeast, which increases by 12–17 % compared with the use of methods not related to aeroion treatment of organic materials. The conducted experimental studies indicate the possibility of using the model to design real aeroion treatment chambers in order to optimize their operation.

Keywords: corona discharge, droplet charge, air ionic activation, drift-diffusion approximation

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about authors: Maxim V. Yanko – Master of Engineering Sciences, Senior Lecturer at Belarusian State Agrarian Technical University. <https://orcid.org/0000-0002-4723-4029>. E-mail: ymv.pps@bsatu.by; Andrei D. Chorny – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Laboratory at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-4716-6123>. E-mail: anchor@hmti.ac.by; Yauheni M. Zayats – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor at Belarusian State Agrarian Technical University. <https://orcid.org/0000-0002-3431-7925>. E-mail: zayatsem@mail.ru

Contribution of the authors: Maxim V. Yanko – conducting experimental studies, interpreting data, formulating conclusions, writing and formatting the text; Andrei D. Chorny – setting up and carrying out calculations, discussing results and conclusions, editing the text; Yauheni M. Zayats – setting research goals and objectives, analyzing results, writing the text of the article.

For citation: Yanko M. V., Chorny A. D., Zayats Ya. M. On the calculation of droplet charging during corona discharge in the chamber of air ionic treatment of organic materials. *Vestsi Natsyyanal'nei akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 1, pp. 37–43 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-1-37-43>

Received: 30.01.2025

Modified: 27.02.2025

Approved for publication: 06.03.2025

Signed to the press: 12.03.2025

Введение. В ряде современных технологических процессов, например электрогазоочистке, электросепарации, пылеподавлении, электроокраске, применяют коронный разряд [1, 2]. Известны способы его использования для интенсификации процесса увеличения концентрации микроорганизмов при их выращивании на питательной среде [3–5].

Возникающий в газовой среде коронный разряд при подаче на электроды высокого напряжения позволяет создать зону ионизации около коронирующего электрода, где происходит размножение заряженных частиц, а во внешней зоне эти частицы дрейфуют вдоль силовых линий электрического поля [1, 6]. При возникновении коронного разряда импульс, передаваемый кулоновской силой заряженным частицам, посредством упругих соударений эффективно распространяется по нейтральным молекулам, что обуславливает движение ионизированного воздуха. Возникает течение, называемое электрическим ветром [6, 7]. При столкновении с частицами аэрозоля или каплями жидкости ионы оседают на них, сообщая им электрический заряд. Таким образом, в разрядном промежутке фактически происходит процесс аэроионизации и образуется движущаяся многокомпонентная среда: ионы, заряженные капли жидкости и нейтральный газ [1, 2, 6].

В настоящее время расчеты и проектирование электрогидродинамических установок, в которых реализуются такие электрогидродинамические течения, в значительной мере базируются на данных экспериментов [2, 8–10]. В теоретическом плане преимущественно рассматриваются одномерные модели течений [6, 7, 11], что не позволяет получить результаты, допускающие учет

сложного характера гидрогазодинамических процессов, неоднородности электрического поля, а также геометрических особенностей конструкции установок [10].

Цель настоящей работы – определить в дрейфово-диффузионном приближении исходные положения, необходимые для описания переноса заряженных частиц в воздухе при действии коронного разряда, а также изменение поверхностного заряда капель в капельно-воздушной среде.

Дрейфово-диффузионное приближение для описания процессов переноса в камере аэроионной обработки органических материалов. Рассмотрим аэроионизацию капельно-воздушных сред с точки зрения справедливости механизмов конвективного переноса в потоке многокомпонентной смеси при наложении электрического поля. Теоретически капельно-воздушная среда рассматривалась в электрогидродинамическом приближении [1, 2]. Учитывая данное приближение нами выполнен анализ аэроионизации с точки зрения справедливости механизмов конвективного переноса в потоке многокомпонентной смеси при наложении электрического поля.

В камере аэроионной обработки органических материалов при прохождении электрического тока движение ионов обеспечивается переносом как за счет конвекции и диффузии, так и миграции в электрическом поле. В связи с этим заряженные частицы могут быть представлены как отдельные компоненты смеси.

Для практического подтверждения теоретических результатов в ходе исследования нами использовалась камера аэроионной обработки органических материалов¹, применяемая для повышения продуктивности микроорганизмов. Устройство представляет собой тройниковое соединение, в котором для коронного разряда реализуется система «игла – цилиндрическая поверхность». В рассматриваемом случае дисперсионной средой является воздух: процесс аэроионизации происходит в поле коронного разряда, через который перемещается дисперсная среда – капли жидкости с органическим материалом. Модель камеры аэроионной обработки представлена на рис. 1.

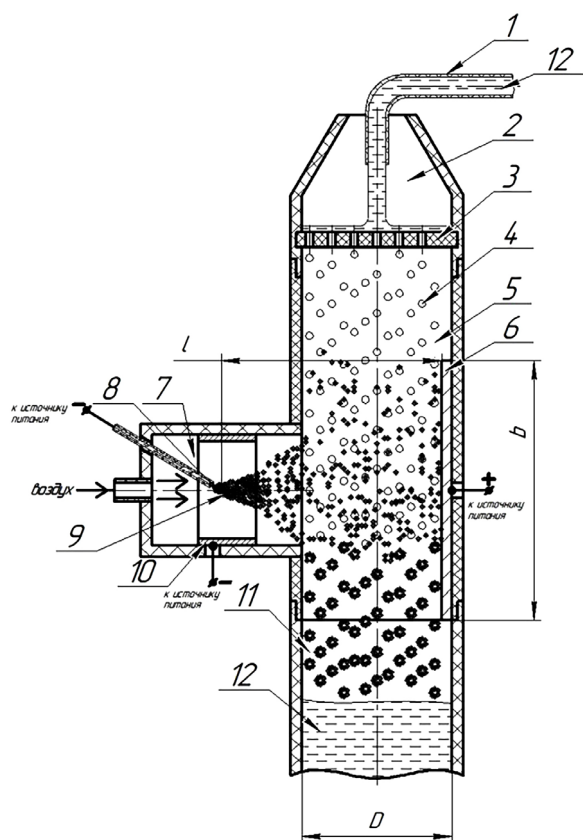


Рис. 1. Камера аэроионной обработки органических материалов: 1 – трубка; 2 – оросительное устройство; 3 – решетка; 4 – капли; 5 – камера аэроионной обработки; 6 – осадительный электрод; 7 – разрядная камера; 8 – коронирующий электрод; 9 – область ионизации; 10 – электрод для очистки воздуха от положительных ионов; 11 – объем обработанной среды; 12 – органический материал (жидкость)

Fig. 1. Aeroion treatment chamber for organic materials: 1 – tube; 2 – irrigation device; 3 – grate; 4 – droplets; 5 – aeroion treatment chamber; 6 – precipitation electrode; 7 – discharge chamber; 8 – corona electrode; 9 – ionization region; 10 – electrode for air purification from positive ions; 11 – volume of the treated medium; 12 – organic material (liquid)

¹ Способ культивирования хлебопекарных дрожжей: пат. 23635 Респ. Беларусь: МПК C12N13/00 / Е. М. Заяц, М. В. Янко, А. Д. Чорный; заявитель Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет». № а 20190290; заявл. 10.10.2019; дата публ.: 30.06.2021.

При описании движения заряженных частиц обычно используют следующие рассуждения [1, 2, 6]. Пусть в смеси имеются частицы, концентрация которых равна N_k . При напряженности электрического поля $\vec{E}$ в смеси со стороны этого поля на частицу действует сила $eN_k\vec{E}$, где e – элементарный заряд электрона. Под воздействием этой силы частица приходит в движение в рассматриваемой среде. Такое движение получило название миграции заряженных частиц [1, 2].

Взаимодействие заряженных частиц при коронном разряде рассматривается на основе аналогии прохождения химических реакций посредством четырех процессов: ионизации, присоединения электронов к нейтральным молекулам, рекомбинации электронов с положительными ионами и рекомбинации положительных и отрицательных ионов [2, 6]. Для коронного разряда в воздухе математическая модель включает три уравнения переноса: для учета движения, генерации и убыли электронов (N_e), положительных (N_p) и отрицательных (N_n) ионов, – в сочетании с уравнением Пуассона (для учета влияния пространственного заряда на электрическое поле):

$$\frac{\partial N_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(N_k V_i^k - D_k \frac{\partial N_k}{\partial x_i} \right) = S_k, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\epsilon_r \epsilon_0 E_i) = \rho_c, \quad (2)$$

где i – повторяющийся индекс, по которому выполняется суммирование, $i = 1, 2, 3$; $k = \{e, p, n\}$ – индексы, указывающие на электрон, положительный и отрицательный ионы; $\vec{E} = \{E_1, E_2, E_3\}$ – напряженность электрического поля, В/м, с Φ – электрическим потенциалом, В; N_k – счетная плотность электронов, положительных и отрицательных ионов, $1/\text{м}^3$; $\vec{V}^k = \{V_1 + z_k \mu_k E_1, V_2 + z_k \mu_k E_2, V_3 + z_k \mu_k E_3\}$ – вектор конвективно-миграционной скорости электронов и ионов, м/с; $z_k = \{-1, 1, -1\}$ – зарядовое число; $\vec{V} = \{V_1, V_2, V_3\}$ – вектор конвективной скорости, м/с; μ_k – подвижность электронов и ионов, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; D_k – коэффициент диффузии электронов и ионов, $\text{м}^2/\text{с}$; S_k – источниковые члены электронов и ионов, $1/\text{м}^3 \cdot \text{с}$; $\epsilon_0 = 8,854e - 12$ – диэлектрическая проницаемость, Кл/(В·м); ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды (для воздуха $\epsilon_r = 1,006$, для воды $\epsilon_r = 80,1$ при 20°C ; $\rho_c = e(N_p - N_e - N_n)$ – объемный заряд, Кл/м³; e – заряд электрона, Кл; t – время, с; x_i – координаты, м.

Учет взаимодействия заряженных частиц при коронном разряде производится через определение членов S_k в уравнениях. Полная химико-кинетическая модель аэроионизации может содержать несколько сотен реакций и частиц, в частности нейтральные молекулы, электронно-возбужденные частицы и ионы [1, 2, 6, 7]. Включенные в рассматриваемую модель три заряженные частицы (электрон, положительный и отрицательный ионы) и четыре основные реакции хорошо описывают поведение коронного разряда [1, 2, 6]. Тогда, учитывая коэффициенты ионизации (α , $1/\text{м}$), присоединения электронов к нейтральным молекулам (η , $1/\text{м}$), а также рекомбинации (k_{ep} и k_{np} , $\text{м}^3/\text{с}$), источниковые члены в уравнениях запишем следующим образом:

$$S_e = (\alpha - \eta) \mu_e N_e |\vec{E}| - k_{ep} N_e N_p, \quad S_n = \eta \mu_e N_e |\vec{E}| - k_{np} N_n N_p, \\ S_p = \alpha \mu_e N_e |\vec{E}| - k_{ep} N_e N_p - k_{np} N_n N_p. \quad (3)$$

В наших расчетах предполагается, что процессы проходят при комнатной температуре и нормальном давлении. В таблице указаны соответствующие этим условиям значения параметров, коэффициенты подвижности и диффузии электронов и ионов, а также коэффициенты реакций.

При реализации отрицательной короны на коронирующем электроде в расчетах камеры аэроионной обработки органических материалов следует учитывать источник вторичных электронов [2, 6]. Столкновение положительных ионов с поверхностью иглы вызывает вторичную эмиссию электронов в камеру, то есть $q_e = \gamma \mu_p N_p |\vec{E}|$. Помимо вторичных электронов, образующихся в результате столкновения положительных ионов с поверхностью коронирующего электрода, в воздушном потоке могут существовать электроны окружающей среды. Количество этих электронов при отрицательной короне пренебрежимо мало по сравнению с теми, которые возникают при вторичной эмиссии [6].

Коэффициенты подвижности и диффузии электронов и ионов, коэффициенты реакций
Coefficients of mobility and diffusion of electrons and ions, reaction coefficients

Параметр, единица измерения Parameter, unit of measurement	Значение Value
Подвижность электронов, μ_e , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ Electron mobility, μ_e , $\text{м}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$	$1,9163 \cdot \vec{E} ^{-0,25}$
Подвижность положительных ионов, μ_p , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ Mobility of positive ions, μ_p , $\text{м}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$	$2,43 \cdot 10^{-4}$
Подвижность отрицательных ионов, μ_n , $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ Mobility of negative ions, μ_n , $\text{м}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$	$2,7 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент диффузии электронов D_e , $\text{м}^2/\text{с}$ Diffusion coefficient of electrons, D_e , $\text{м}^2/\text{s}$	0,18
Коэффициент диффузии положительных ионов, D_p , $\text{м}^2/\text{с}$ Diffusion coefficient of positive ions, D_p , $\text{м}^2/\text{s}$	$0,028 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент диффузии отрицательных ионов, D_n , $\text{м}^2/\text{с}$ Diffusion coefficient of negative ions, D_n , $\text{м}^2/\text{s}$	$0,043 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент ионизации, α , $1/\text{м}$ Ionization coefficient, α , $1/\text{m}$	$3,5 \cdot 10^5 \exp(-1,65 \cdot 10^7 / \vec{E})$
Коэффициент присоединения электронов к нейтральным молекулам, η , $1/\text{м}$ Coefficient of attachment of electrons to neutral molecules, η , $1/\text{m}$	$1,5 \cdot 10^3 \exp(-2,5 \cdot 10^6 / \vec{E})$
Коэффициент рекомбинации положительных ионов и электронов, k_{ep} , $\text{м}^3/\text{с}$ Coefficient of recombination of positive ions and electrons, k_{ep} , $\text{м}^3/\text{s}$	$2 \cdot 10^{-13}$
Коэффициент рекомбинации положительных и отрицательных ионов, k_{np} , $\text{м}^3/\text{с}$ Coefficient of recombination of positive and negative ions, k_{np} , $\text{м}^3/\text{s}$	$2 \cdot 10^{-13}$
Коэффициент вторичной эмиссии электронов, γ Coefficient of secondary electron emission, γ	0,01

Уравнения (1) дополняются уравнениями неразрывности и переноса импульса, где учитывается кулоновская сила:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_i)}{\partial x_i} = 0; \quad \frac{\partial (\rho V_j)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_i V_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \right) + F_{K,j} + F_{D,j}. \quad (4)$$

Здесь ρ – плотность среды, $\text{кг}/\text{м}^3$; p – гидростатическое давление, Па; μ – динамическая вязкость, Па·с. Сила Кулона, возникающая за счет наличия ионов и электронов в воздушном потоке, определяется согласно выражению $\vec{F}_k = \rho_c \vec{E}$. В свою очередь сила аэродинамического сопротивления капли, движущейся в воздушном потоке, равна $\vec{F}_D = C_D \pi d_d^2 \rho |\vec{V} - \vec{V}_d| (\vec{V} - \vec{V}_d) / 8$ [1, 2, 7]. Движение капель (изменение скорости $\vec{V}_d$ и положения $\vec{x}_d$) и заряда капли описывается в лагранжевом представлении как

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{x}_d}{dt} &= \vec{V}_d, \quad m_d \frac{d\vec{V}_d}{dt} = \frac{1}{8} C_D \pi d_d^2 \rho |\vec{V} - \vec{V}_d| (\vec{V} - \vec{V}_d) + \frac{1}{6} \pi d_d^3 \bar{g} (\rho_d - \rho) + q_d \vec{E}, \\ \frac{dq_d}{dt} &= e (\vec{J}_e + \vec{J}_n + \vec{J}_p) \Big|_d, \quad \vec{J}_k = z_k \mu_k N_k \vec{E}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь m_d , V_d , d_d , ρ_d , q_d , C_D – соответственно масса (кг), скорость (м/с), диаметр (м), плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$), заряд ($\text{Кл}/\text{м}^3$) и коэффициент сопротивления капли в приближении сферической частицы. Также учитывается сила тяжести для капель.

Граничные условия для представленного набора математических уравнений ставятся для электрогидродинамических условий, реализующихся в камере аэроионной обработки определенной конструкции. Как указано выше, при коронном разряде в окрестности коронирующего электрода существует зона ионизации. Когда расстояние между коронирующим и осадительным электродами достаточно большое, то зона ионизации формирует однородную оболочку вокруг поверхности коронирующего электрода. Обычно при моделировании толщину этой оболочки достаточно малого размера оценивают и исключают из области расчета. С этой целью необходи-

мую для инициирования процесса ионизации критическую напряженность E_{th} на поверхности коронирующего электрода определяют с помощью эмпирической формулы Пика [1]. Однако исключение из расчета области ионизации может приводить к переоценке электрогидродинамического давления в окрестности коронирующего электрода [1, 2, 6]. Поэтому предпочтительнее проводить прямой расчет с учетом наличия зоны ионизации. Для твердых стенок камеры аэро-ионной обработки задаются условия электроизоляции и непротекания заряда, условия прилипания для скорости (компоненты скорости равны нулю) и условие теплоизоляции. На входной границе для воздуха задается расход воздуха и концентрация заряженных частиц, в свою очередь на входной границе каплей – их расход. Нулевое напряжение устанавливается на осадительном электроде, а на коронирующем электроде – условие отрицательной короны, которое связано с условием для объемного заряда.

Результаты и их обсуждение. Теоретическая постановка задачи настоящего исследования позволяет получение результатов, учитывающих переменные свойства среды и геометрические особенности, для анализа неоднородности как самого электрического поля, так и обратного влияния его свойств на заряд и динамику каплей жидкой среды. Это связано с применением модели для проектирования реальных камер аэроионной обработки с целью оптимизации их работы.

Экспериментально показано (рис. 2), что при аэрации среды продукт вместе с питательной средой в форме капель размером 5–6 мм пролетает через объем аэроионов в электрическом поле постоянного тока напряженностью до $30 \cdot 10^3$ В/м расстояние, равное $b = 0,2$ м, при этом капли получают электрический заряд до $9 \cdot 10^{-4}$ Кл/м³. Электрический заряд молекул питательной среды и дрожжевой клетки в капле влияет на диффузию питательных веществ внутрь клетки и, как следствие, на развитие и продуктивность дрожжей, которая увеличивается на 12–17 % по сравнению с применением способов, не связанных с аэроионной обработкой органических материалов [12].

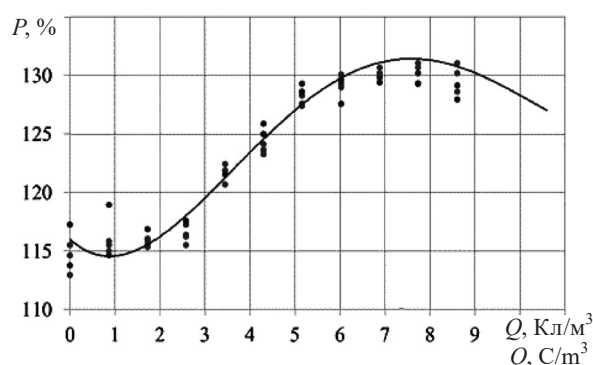


Рис. 2. Зависимость продуктивности (P , %) органической среды от приобретенного электрического заряда капель (Q , Кл/м³)

Fig. 2. Dependence of the productivity (P , %) of the organic medium on the acquired electric charge of droplets (Q , C/м³)

Закключение. Таким образом, представлена в дрейфово-диффузионном приближении математическая модель, описывающая перенос заряженных частиц в воздухе при действии коронного разряда, а также изменение поверхностного заряда капель в капельно-воздушной среде. Данная модель позволяет рассчитывать динамику сообщения заряда каплям органических материалов при их аэроионной обработке с учетом неоднородности электрического поля коронного разряда.

Проведенные экспериментальные исследования указывают на возможность применения модели для проектирования реальных камер аэроионной обработки с целью оптимизации их работы.

Список использованных источников

1. Жакин, А. И. Электрогидродинамика / А. И. Жакин // Успехи физических наук. – 2012. – Т. 182, № 5. – С. 495–520. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201205b.0495>

2. Electrohydrodynamics and its applications: Recent advances and future perspectives / K. Iranshahi, T. Defraeye, R. M. Rossi, U. C. Müller // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2024. – Vol. 232. – Art. ID 125895. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125895>
3. The effects of electric, magnetic and electromagnetic fields on microorganisms in the perspective of bioremediation / G. Beretta, A. F. Mastorgio, L. Pedrali [et al.] // *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. – 2019. – Vol. 18. – P. 29–75. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-09491-9>
4. Palaniappan, S. Effects of Electricity on Microorganisms: A Review / S. Palaniappan, S. K. Sastry, E. R Richter // *Journal of Food Processing and Preservation*. – 1990. – Vol. 14, Iss. 5. – P. 393–414. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.1990.tb00142.x>
5. Electric stimulation: a versatile manipulation technique mediated microbial applications / Manjila Adhikari, Li Wang, Dhurba Adhikari [et al.] // *Bioprocess and Biosystems Engineering*. – 2024. – Vol. 48, Iss. 2. – P. 171–192. <https://doi.org/10.1007/s00449-024-03107-z>
6. Стишков, Ю. К. Коронный разряд и электрогазодинамические течения в воздухе / Ю. К. Стишков, А. В. Самусенко, И. А. Ашихмин // *Успехи физических наук*. – 2018. – Т. 188, № 12. – С. 1331–1345. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.06.038358>
7. Asipuela, A. Study and Numerical Simulation of Negative and Positive Corona Discharge: A Review / A. Asipuela, T. Iváncsy // *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*. – 2022. – Vol. 66, Iss. 3. – P. 294–300. <https://doi.org/10.3311/PPee.19952>
8. Ashutosh Singh. A Comprehensive Review on Electrohydrodynamic Drying and High-Voltage Electric Field in the Context of Food and Bioprocessing / Ashutosh Singh, V. Orsat, Vijaya Raghavan // *Drying Technology*. – 2012. – Vol. 30, Iss. 16: Special Issue to Celebrate the 60th Birthday of Prof. Soponronnarit. – P. 1812–1820. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.708912>
9. Бурак, Л. Ч. Использование озоновой технологии в пищевой промышленности / Л. Ч. Бурак. – Минск: СтройМедиаПроект, 2022. – 144 с.
10. Zayats, Ya. Practical Electrotechnology / Ya. Zayats, A. Chorny. – Cambridge Scholars Publishing, UK, 2023. – 334 p.
11. A review of modeling bioelectrochemical systems: engineering and statistical aspects / S. Luo, H. Sun, Q. Ping [et al.] // *Energies*. – 2016. – Vol. 9, Iss. 2. – P. 1–27. <https://doi.org/10.3390/en9020111>
12. Янко, М. В. Аэроионная активация некоторых микробиологических процессов / М. В. Янко, Е. М. Заяц // *Агропанорама*. – 2019. – № 1 (131) – С. 28–29.

References

1. Zhakin A. I. Electrohydrodynamics. *Physics–Uspekhi*, 2012, vol. 55, iss. 5, pp. 465–488. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201205b.0495>
2. Iranshahi K., Defraeye T., Rossi R. M., Müller U. C. Electrohydrodynamics and its applications: Recent advances and future perspectives. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, vol. 232, art. ID 125895. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125895>.
3. Beretta G., Mastorgio A. F., Pedrali L., Saponaro S., Sezenna E. The effects of electric, magnetic and electromagnetic fields on microorganisms in the perspective of bioremediation. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2019, vol. 18, pp. 29–75. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-09491-9>
4. Palaniappan S., Sastry S. K., Richter E. R. Effects of Electricity on Microorganisms: A Review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 1990, vol. 14, iss. 5, pp. 393–414. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4549.1990.tb00142.x>
5. Manjila Adhikari, Li Wang, Dhurba Adhikari, Sujana Khadka, Mati Ullah, Bricard Mbituyimana, Clemence Futila Bukatuka, Zhijun Shi, Guang Yang. Electric stimulation: a versatile manipulation technique mediated microbial applications, *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2024, vol. 48, iss. 2, pp. 171–192. <https://doi.org/10.1007/s00449-024-03107-z>
6. Stishkov Yu. K., Samusenko A. V., Ashikhmin I. A. Corona discharge and electrogasdynamic flows in the air. *Physics–Uspekhi*, 2018, vol. 61, iss. 12, pp. 1331–1345. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.06.038358>
7. Asipuela A., Iváncsy T. Study and Numerical Simulation of Negative and Positive Corona Discharge: A Review. *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 2022, vol. 66, iss. 3, pp. 294–300. <https://doi.org/10.3311/PPee.19952>
8. Ashutosh Singh, Orsat V., Vijaya Raghavan. A Comprehensive Review on Electrohydrodynamic Drying and High-Voltage Electric Field in the Context of Food and Bioprocessing. *Drying Technology*, 2012, vol. 30, iss. 16: Special Issue to Celebrate the 60th Birthday of Prof. Soponronnarit, pp. 1812–1820. <http://doi.org/10.1080/07373937.2012.708912>
9. Burak L. Ch. *Using Ozone Technology in the Food Industry*. Minsk, StroyMediaProekt Publ., 2022. 144 p. (in Russian).
10. Zayats Ya., Chorny A. *Practical Electrotechnology*. Cambridge Scholars Publishing, UK, 2023. 334 p.
11. Luo S., Sun H., Ping Q., Jin R., He Z. A review of modeling bioelectrochemical systems: engineering and statistical aspects. *Energies*, 2016, vol. 9, iss. 2, pp. 1–27. <https://doi.org/10.3390/en9020111>
12. Yanko M. V., Zayats Ya. M. Aeroionic activation of some microbiological processes. *Agropanorama*, 2019, no. 1 (131), pp. 28–29 (in Russian).