

сычужное свертывание, разрезка сгустка, второе нагревание и выгрузка) в закрытых ваннах производится автоматически. Использование вместо парового нагревания циркуляции горячей воды в рубашке позволяет избежать возникновения горячих пятен на стенках и дне ванны, являющихся причиной пригорания и образования твердых, жестких сгустков. Однако наиболее распространенным способом нагревания на сегодняшний день является впрыскивание пара в рубашку, предварительно заполненную водой [1]. Проблема прилипания сгустка в некоторых ваннах была преодолена путем изменения формы и направления вращения ножей. В большинстве случаев угол наклона лезвий в раме ножа или мешалки устанавливаются таким образом, что в одном направлении устройство работает как режущий нож, а в другом – как мешалка.

Процесс нагрева и созревания сырной массы в сыродельной ванне можно, таким образом, охарактеризовать нестационарностью динамических параметров, обусловленной изменением теплофизических характеристик сырья – сырной массы – при нагреве и созревании. Поэтому актуальной можно считать задачу учета возможных изменений значений параметров динамической модели объекта в системе управления нагревом. Одним из путей решения этой задачи является использование адаптивных методов управления.

В сырной ванне по сложному алгоритму требуется поддержание температуры нагрева воды в рубашке. Поскольку переменна скорость нарастания температуры и ее заданное значение меняется во времени, то требуется использовать САР, реализующую непрерывный закон регулирования.

Ванна, как объект автоматического регулирования температуры воды, представляет собой апериодическое звено первого порядка рисунок 1 [2, с. 132].

При постоянной времени объекта $T_n=500$ с, времени запаздывания $\tau=20$ с (с учетом запаздывания в регулирующем органе) и времени регулирования $t_{рег}=800$ с определим закон регулирования с помощью диаграммы А.Я. Лернера. В рассматриваемой системе используется ПИД-закон.

Литература

1. Благовещенская, М.М. Информационные технологии систем управления технологическими процессами / М.М. Благовещенская, Л. А. Злобин. – М.: Высш. шк., 2015. – 768 с.
2. Шингарева, Т.И. Производство сыра: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений по специальности «Технология хранения и переработки животного сырья» / Т.И. Шингарева, Р.И. Раманаскас. – Минск: ИВЦ Минфина, 2018. – 384 с.

УДК 537.568

К ЗАРЯДКЕ КАПЕЛЬ В ПОЛЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА ИОНОАКТИВАТОРА

Заяц¹ Е.М., д.т.н., профессор, **Чорный² А.Д.**, к.ф.-м.н., доцент,

Янко¹ М.В., **Кудинович¹ А.Н.**, аспирант

¹Белорусский государственный аграрный технический университет,

²Институт тепло- и массообмена А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск

Аэроионная активация основана на воздействии молекулами воздуха, заряженными в электрическом поле на жидкие и газообразные среды с целью изменения их состояния, поведения, свойств. Возникающий в газовой среде коронный разряд при подаче на электроды высокого напряжения позволяет создать зону ионизации около коронирующего электрода, в которой происходит размножение заряженных частиц, а во внешней зоне происходит их дрейф вдоль силовых линий электрического поля. При столкновении с частицами, например аэрозоля, капель жидкости, ионы оседают на них, сообщая им электрический заряд. Таким образом, в разрядном промежутке фактически образуется

многофазная среда: ионы, заряженные частицы аэрозоля и нейтральный газ. В настоящее время расчеты и проектирование установок, в которых реализуются такие электрогазодинамические течения, в значительной мере базируются на данных экспериментов [1, 2]. В теоретическом плане преимущественно рассматриваются одномерные модели течений, что не позволяет получение результатов, допускающих учет неоднородного сложного характера газодинамических процессов, неоднородности электрического поля, а также геометрических особенностей конструкции установок.

В настоящей работе в дрейфово-диффузионном приближении определены исходные положения, описывающие перенос заряженных частиц в воздухе при действии коронного разряда, а также изменение поверхностного заряда капель в капельно-воздушной среде. В качестве устройства рассматривается концентратор аэроионного активатора в виде тройникового соединения, где для коронного разряда реализуется система «игла-цилиндрическая поверхность».

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):

$$\frac{\partial N_k}{\partial t} + \frac{\partial(N_k V_x^k)}{\partial x} + \frac{\partial(N_k V_y^k)}{\partial y} + \frac{\partial(N_k V_z^k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_k \frac{\partial N_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_k \frac{\partial N_k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_k \frac{\partial N_k}{\partial z} \right) + S_k, \quad k = \{e, p, n\} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_r \epsilon_0 E_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\epsilon_r \epsilon_0 E_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\epsilon_r \epsilon_0 E_z) = \rho_c, \quad (2)$$

где $k = \{e, p, n\}$ – индексы, указывающие на электрон, положительный и отрицательный ионы; $\vec{E} = \{E_x, E_y, E_z\}$, (В/м) или (Н/Кл) – напряженность электрического поля, (В); N_k – счетная плотность электронов, положительных и отрицательных ионов, ($1/\text{м}^3$); $\vec{V}^k = \{V_x + z_k \mu_k E_x, V_y + z_k \mu_k E_y, V_z + z_k \mu_k E_z\}$ – вектор конвективно-миграционной скорости электронов и ионов, (м/с); $z_{e,p,n} = \{-1, 1, -1\}$ – зарядовое число; $\vec{V} = \{V_x, V_y, V_z\}$ – вектор конвективной скорости, (м/с); $\mu_{e,p,n}$ – подвижность электронов и ионов ($\text{м}^2/\text{В с}$); $D_{e,p,n}$ – коэффициент диффузии электронов и ионов, ($\text{м}^2/\text{с}$); $S_{e,p,n}$ – источниковые члены электронов и ионов, ($1/\text{м}^3 \text{ с}$); $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ – диэлектрическая проницаемость, (Кл/В м); ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды (для воздуха $\epsilon_r = 1.006$, для воды – 80.1 при 20 °С); $\rho_c = e(N_p - N_e - N_n) = e \sum_{k=e,p,n} z_k N_k$ – объемный заряд, (Кл/м³); e – заряд электрона, (Кл); t – время, (с); x, y, z – координаты, (м).

Взаимодействие заряженных частиц при коронном разряде рассматривается на основе аналогии протекания химических реакций посредством четырех процессов: ионизации, присоединения электронов к нейтральным молекулам, рекомбинации электронов с положительными ионами и рекомбинации положительных и отрицательных ионов. Учет производится через определение членов $S_{e,p,n}$ в уравнениях (1). Хотя полная кинетическая модель аэроионизации может содержать несколько сотен реакций и частиц, включая нейтральные молекулы, электронно-возбужденные частицы и ионы [1], включенные в рассматриваемую модель 3 заряженные частицы (электрон, положительный и отрицательный ионы) и 4 основные реакции хорошо описывают поведение коронного разряда [1]. Тогда учитывая коэффициент ионизации α , ($1/\text{м}$), коэффициент присоединения

электронов к нейтральным молекулам η , (1/м), коэффициенты рекомбинации k_{ep} и k_{np} , ($\text{м}^3/\text{сек}$), источниковые члены в уравнениях (1) записываются как

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

Коэффициенты подвижности и диффузии электронов и ионов, а также коэффициенты реакций приведены в таблице 1. Поскольку в наших расчетах предполагается, что процессы проходят при комнатной температуре и нормальном давлении, то таблица 1 содержит соответствующие этим условиям значения параметров.

Таблица 1 – Коэффициенты подвижности и диффузии электронов и ионов, коэффициенты реакций

Параметр	Значение	Единица измерения
Подвижность электронов μ_e	$1,9163 \times \vec{E} ^{-0.25}$	$\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
Подвижность положительных ионов μ_p	$2,43 \times 10^{-4}$	$\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
Подвижность отрицательных ионов μ_e	$2,7 \times 10^{-4}$	$\text{м}^2/\text{В}\cdot\text{с}$
коэффициент диффузии электронов D_e	0,18	$\text{м}^2/\text{с}$
коэффициент диффузии положительных ионов D_p	$0,028 \times 10^{-4}$	$\text{м}^2/\text{с}$
коэффициент диффузии отрицательных ионов D_n	$0,043 \times 10^{-4}$	$\text{м}^2/\text{с}$
коэффициент ионизации α	$3,5 \times 10^5 \exp(-1,65 \times 10^7 / \vec{E})$	1/м
коэффициент присоединения электронов к нейтральным молекулам η	$1,5 \times 10^3 \exp(-2,5 \times 10^6 / \vec{E})$	1/м
коэффициент рекомбинации положительных ионов и электронов k_{ep}	2×10^{-13}	$\text{м}^3/\text{с}$
коэффициенты рекомбинации положительных и отрицательных ионов k_{np}	2×10^{-13}	$\text{м}^3/\text{с}$
Коэффициент вторичной эмиссии электронов γ	0,01	

При реализации отрицательной короны на коронирующем электроде в расчетах концентратора следует учитывать источник вторичных электронов. Столкновение положительных ионов с поверхностью иглы вызывает вторичную эмиссию электронов в концентратор, т. е. $q_e = \gamma\mu_p N_p |\vec{E}|$. 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.

Система дополняется уравнениями газовой динамики, где учитывается кулоновская сила. Уравнения неразрывности и переноса импульса в воздушном потоке:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho V_k}{\partial x_k} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\rho V_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho V_k V_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial V_j}{\partial x_k} + \frac{\partial V_k}{\partial x_j} \right) \right) + F_{K,i} + F_{D,i}. \quad (5)$$

где ρ – плотность среды, (кг/м^3); p – гидростатическое давление, (Па); μ – динамическая вязкость, (Па·с).

Электрогидродинамическая сила Кулона, возникающая за счет наличия ионов и электронов в воздушном потоке $\vec{F}_k = \rho_e \vec{E}$. Сила аэродинамического сопротивления капли, движущейся в воздушном потоке $\vec{F}_D = \frac{1}{8} C_D \pi d_d^2 \rho |\vec{V} - \vec{V}_d| (\vec{V} - \vec{V}_d)$. Движение капель (изменение скорости \vec{V}_d и положения \vec{x}_d) и заряда капли описывается в Лагранжевом представлении как

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

Здесь $m_d, V_d, d_d, \rho_d, q_d, C_D$ – масса, скорость, диаметр, плотность, заряд и коэффициент сопротивления капли как сферической частицы. Сила тяжести для капель также учитывается.

Теоретическая постановка общей задачи позволила получить результаты, учитывающие переменные свойства среды, геометрические особенности разрядной камеры, неоднородность электрического поля, а также обратное влияние его свойств на заряд и динамику капель жидкой среды. Разработанная модель необходима для расчета параметров реальных устройств аэроионной активации.

Литература

1. Стишков Ю.К., Самусенко А.В., Ашихмин И.А. Коронный разряд и электрогазодинамические течения в воздухе. Успехи физических наук. 2018. Т. 188, № 12. С. 1331-1345.
2. Жакин А. И. Электрогидродинамика. Успехи физических наук. 2012. Т. 182. С. 495–520.