

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО КОПЧЕНИЯ БЕЗДЫМНЫМ СПОСОБОМ

В статье дана классификация электростатических способов копчения продуктов питания на примере рыбопродуктов. Подробно рассматриваются стадии процесса электростатического бездымного способа и происходящие при этом электрофизические процессы.

Предложена схема контактного способа зарядки копильного препарата и математические зависимости, позволяющие рассчитать основные характеристики копильной среды при бездымном копчении. Теоретически исследованы силы, действующие на заряженную частицу копильного препарата при бездымном копчении в зависимости от параметров установки, технологического режима и свойств материала копильного препарата.

Ключевые слова: рыбопродукты, копчение, технология, электростатическая установка, конструкция, технические характеристики.

V.V. Selunsky, V.Yu. Churin

THE ELECTROSTATIC SMOKING PROCESS OPTIMIZATION BY THE SMOKE-FREE WAY

The classification of food smoking electrostatic ways on the example of fish products is given in the article. The stages of electrostatic smoke-free way process and electric physical processes occurring in it are considered in detail.

The scheme of the smoking preparation charging contact way and the mathematical dependences, allowing to calculate the main characteristics of the smoking environment for the smoke-free smoking are offered. The forces operating on the charged particle of the smoking preparation in the smoke-free smoking depending on the installation parameters, the technological mode and the properties of the smoking preparation material are theoretically investigated.

Key words: fish products, smoking, technology, electrostatic installation, design, technical characteristics.

При производстве продуктов питания и полуфабрикатов, в частности, рыбных и мясных, широко применяется копчение. В зависимости от температуры процесса различают холодное, горячее и полугорячее копчение. При холодном копчении температура копильной среды не превышает + 40 °С. Горячее копчение производится в диапазоне температур +80...170 °С. Полугорячее копчение происходит при температуре + 40...80 °С [1, 2].

В зависимости от вида копильной среды различают три способа копчения: дымовое, бездымное (мокрое), смешанное. Дымовое – копчение продуктами разложения древесины, используемыми в состоянии аэрозоля (дым). Бездымное (мокрое) – копчение продуктами разложения древесины, используемыми в виде растворов. Такими растворами могут быть копильная жидкость, дымовое масло, копильный раствор и т.д. [2, 4]. Смешанное – копчение продуктами разложения древесины, используемыми в жидком и газообразном (дым) состоянии [2].

По особенностям проведения процесса копчение можно классифицировать как естественное, искусственное, комбинированное. Естественное копчение – осаждение копильного препарата на поверхности продукта и проникновение внутрь его. Осуществляется без применения специальных технических приемов, активизирующих процесс. Искусственное – осаждение копильного препарата на поверхность продукта и проникновение его внутрь с применением специальных технических приемов, ускоряющих процесс. Комбинированное копчение заключается в том, что некоторые стадии процесса осуществляются с применением специальных технических приемов, активизирующих процесс.

В настоящее время в основном применяется естественное дымовое копчение. Недостаток этого способа заключается в длительности процесса копчения, продолжительность которого может достигать для некоторых рыбных продуктов нескольких суток [1].

Значительно сокращается процесс приготовления продуктов при использовании технологии электростатического копчения, при котором заряженные частицы копильной среды осаждаются на продукт в электрическом поле. Электростатическое копчение может быть осуществлено как при дымовом, так и при бездымном (мокроем) копчении [1,2].

Недостатком бездымного копчения является то, что продукт получается несколько худшего качества по сравнению с дымовым копчением, так как в копильных препаратах содержится меньшее количество копильных компонентов, чем в копильном дыме. Сказывается недостаточная изученность технологического процесса, кроме того промышленность не выпускает серийное оборудование для бездымного копчения.

Рассмотрим процесс бездымного электростатического копчения рыбных продуктов. На рисунке 1 показан принцип действия электрокопильной установки, реализующей процесс бездымного копчения.

Копильная жидкость подается в камеру копильной установки с помощью пневматической форсунки. Полученные частицы аэрозолей за счет контакта с распылителем, к которому подведено высокое напряжение, получают заряд. Полярность этого заряда такая же, как и подведенное напряжение на распылителе. Затем частицы попадают в зону осаждения, где под действием электрических сил осаждаются на продукте.

Процесс бездымного копчения рыбы в электростатическом поле можно разделить на три стадии:

- 1) распыление и зарядка частиц копильной жидкости;
- 2) движение заряженных частиц к продукту;
- 3) осаждение и поведение заряженных частиц на продукте. При этом происходит частичное проникновение (диффузия) некоторой части частиц копильной жидкости в поверхностные слои мяса рыбы и пленкообразование за счет структурирования раствора копильной жидкости на поверхности рыбы.

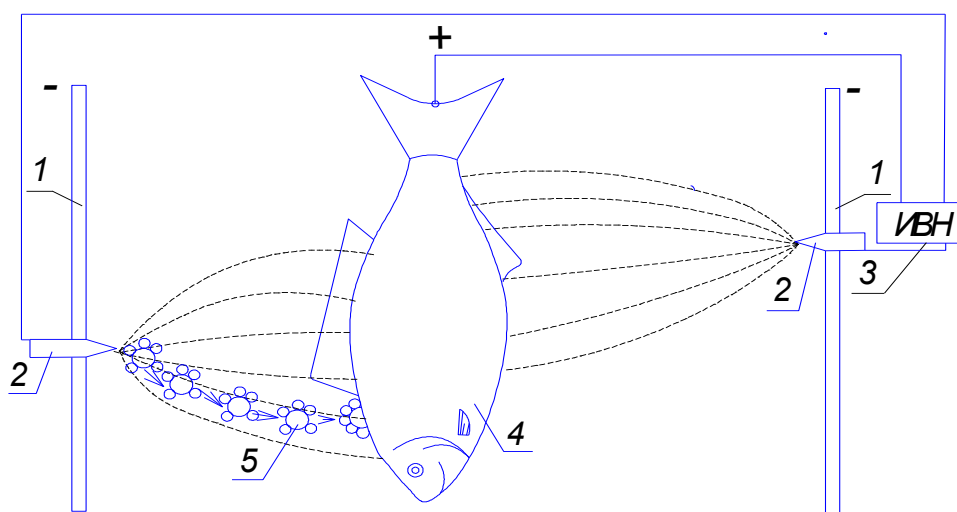


Рис. 1. Схема работы электростатической копильной установки:
1 – стенка электростатической копильной установки; 2 – форсунка;
3 – источник высокого напряжения; 4 – рыба;
5 – частица копильной жидкости

Рассмотрим подробнее стадии процесса электростатического бездымного копчения.

1. Распыление и зарядка частиц копильной жидкости. Существующие процессы электрокопчения различаются в первую очередь способом зарядки материала и связанной с этим величиной заряда капли; заряд капли в свою очередь влияет на протекание всех остальных процессов электрокопчения. Для улучшения процесса желательно, чтобы заряд капли был максимальным.

Из возможных способов зарядки жидкости при электрокопчении применяют пока только два: ионную зарядку и контактную зарядку.

1.1. Ионная зарядка. При этом методе электрокопчения применяется коронирующая сетка, вокруг которой образуются ионы газов воздуха; копильный препарат распыляется форсункой в воздушное пространство между сеткой и рыбным продуктом. Зарядка происходит в результате осаждения ионов на капли копильной жидкости, взвешенные в воздухе и находящиеся в электрическом поле. Ионы осаждаются на капли копильного препарата вследствие своего теплового и направленного движения в электрическом поле.

Максимально возможный заряд, полученный при этом каплей, равен:

$$Q_{\text{макс}} = \left(1 + 2 \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2}\right) \cdot \varepsilon R^2 E, \quad (1)$$

где $Q_{\text{макс}}$ — заряд капли;

ε — диэлектрическая проницаемость копильного препарата;

E — напряженность поля в данной точке;

R — радиус капли.

Этот метод зарядки капель в настоящее время имеет ограниченное применение; он уступает контактно-ному способу зарядки, при котором можно получить заряд капли значительно большей величины.

1.2. Контактная зарядка материала происходит в щелевых, чашечных, грибовых и дисковых распылителях при контакте копильного препарата с острой кромкой заряжающего устройства, присоединенного к источнику высокого напряжения. Затем под действием электрического поля заряженный материал отрывается от поверхности кромки.

Процесс контактной зарядки можно схематически представить следующим образом (рис. 2). На поверхности электрода (см. рис. 2, а) при подключении высокого напряжения появляется поверхностный заряд плотностью σ . Если электрод покрыть слоем копильного препарата, то этот заряд перейдет на поверхность материала (см. рис. 2, б), так как в этих условиях он является проводником электричества. Под влиянием сил электрического поля заряженный копильный препарат начнет «вытягиваться» с поверхности по направлению к изделию (см. рис. 2, в); образующаяся капля оторвется и унесет на своей поверхности полученный ею заряд.

Напряженность поля E и поверхностная плотность заряда σ увеличиваются около острых кромок и поэтому для зарядки материала выбирают электрод вытянутой формы (рис. 2, г), который обеспечивает получение заряда большой величины. Все распылители — чашечные, дисковые, лотковые, щелевые — должны иметь острые кромки.

При большой напряженности поля около острой кромки электрода появляется коронный разряд.

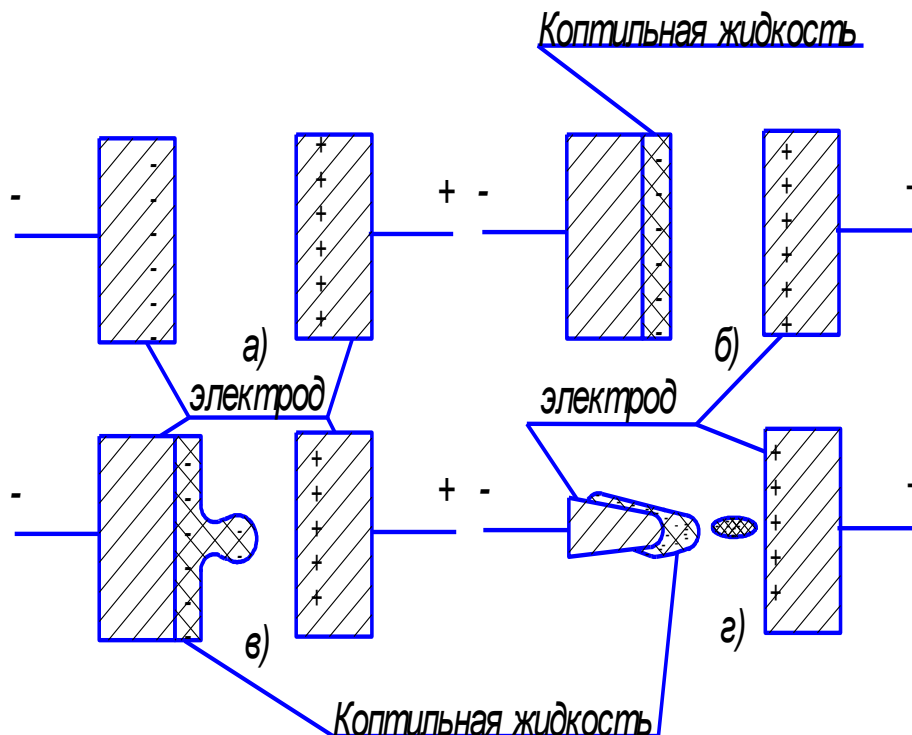


Рис. 2. Схема контактной зарядки копильного препарата: а — подключение высокого напряжения; б — переход заряда на поверхность копильного препарата; в — вытягивание заряженного материала под влиянием электрического поля; г — отрыв заряженной капли от электрода

Величина заряда капли при контактной зарядке выражается уравнением

$$Q = R^2 \cdot \frac{U}{r \ln \frac{2H}{r}} \cdot \left[1 - A \cdot 10^{-12} \frac{\varepsilon \rho_v}{H^2} \cdot (U - U_k) \right], \quad (2)$$

где Q – величина заряда капли;

R – радиус капли;

U – напряжение источника питания;

r – радиус острой кромки распылителя;

H – расстояние от распылителя до изделия;

A – расчетная постоянная;

ε – диэлектрическая проницаемость копильного препарата;

ρ_v – удельное объемное сопротивление копильного препарата;

U_k – начальное напряжение, соответствующее появлению коронного разряда на распылителе.

Из этой формулы видно влияние параметров установки (H , r , U_k), технологического режима (U) и свойств материала (ε , ρ_v) на величину заряда капли.

Величина заряда возрастает при увеличении приложенного напряжения и уменьшается при увеличении H , r , ε , ρ_v . Формула для определения величины заряда является приближенной. Более точные расчеты показывают, что заряд уменьшается также с увеличением подачи копильного препарата и величины частиц жидкости.

Распыление копильного препарата, т.е. разрыв его электрическими силами на мелкие капли происходит вследствие отталкивания одноименных зарядов на поверхности капли, а также деформации капли в электрическом поле.

Капля, попавшая в электрическое поле даже при отсутствии на ней заряда, деформируется и вытягивается вдоль линий напряженности поля.

Противодействующими силами являются силы поверхностного натяжения или прочности полимеров.

Расчет наибольшего радиуса капли, которая может существовать в электрическом поле без разрыва, произведен на основании рассмотрения сил, разрывающих каплю, и сил поверхностного натяжения копильного препарата.

$$R_{\text{макс}} = \frac{A_2 a}{A_3 \sigma^2 + \varepsilon E_2}, \quad (3)$$

где a – поверхностное натяжение материала;

σ – поверхностная плотность зарядов на капле;

ε – диэлектрическая проницаемость;

E_2 – напряженность поля в данной точке;

A_2 и A_3 – расчетные постоянные.

Если радиус капли больше $R_{\text{макс}}$, она разорвется на более мелкие капли. Хорошее распыление копильного препарата с образованием мелких капель имеет большое значение при проведении процесса электрокопчения. Большое поверхностное натяжение копильного препарата и малая величина заряда указывают на плохие характеристики копильного препарата с точки зрения распыления. В этом случае применяют вращающиеся распылители, где распыление происходит не только в результате воздействия сил электрического поля, но одновременно и механических сил. В щелевых распылителях распыление происходит только в результате воздействия электрического поля и поэтому копильные препараты, применяемые для распыления, должны иметь очень хорошие характеристики.

2. Движение заряженных частиц к продукту можно рассматривать как движение материального тела. На заряженную частицу в электрокопильной установке действуют следующие силы [4]:

$$\sum F = F_g + F_E + F_\kappa + F_{эл.в} + F_c, \quad (4)$$

где F_g — сила тяжести;
 F_E — сила, обусловленная неравномерным распределением напряженности электрического поля;
 F_κ — сила, обусловленная взаимодействием электрического поля и заряда частиц (кулоновская сила);
 $F_{эл.в}$ — сила электрического ветра;
 F_c — сила сопротивления среды.

Рассмотрим действие каждой из данных сил более подробно.

Величину силы тяжести можно определить из следующего выражения:

$$F_g = mg \quad (5)$$

где m — масса частицы;

g — ускорение свободного падения.

Действие сил тяжести на частицы невелико, что следует из данных о скорости падения в спокойном воздухе частицы плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ (см. табл. 1).

Время, за которое частицы аэрозоля пролетают расстояние между форсункой и продуктом, при принятых скоростях воздушного потока, не превышает 0,06–0,5 с. В течение этого времени частица, например, диаметром 1 мкм, под действием силы тяжести падает всего на несколько микрон. Поэтому влиянием данной силы на движение частицы в электрокопильной установке можно пренебречь.

Таблица 1

Скорости оседания сферических частиц в воздухе при 760 мм рт.ст. и 20° С

Диаметр частицы, мкм	0,1	0,2	0,4	1,0	2,0	4,0	10
Скорость падения, см/с	$8,71 \cdot 10^{-5}$	$2,27 \cdot 10^{-4}$	$6,85 \cdot 10^{-4}$	$3,49 \cdot 10^{-3}$	$1,29 \cdot 10^{-2}$	$5,00 \cdot 10^{-2}$	$3,03 \cdot 10^{-1}$

Величина силы, обусловленная взаимодействием электрического поля и заряда частиц (кулоновская сила), определяется из соотношения

$$F_\kappa = Eq, \quad (6)$$

где E — напряженность поля;

q — заряд капли.

Данная сила, действующая на частицу, является одной из основных в электрокопильной установке.

Сила, обусловленная неравномерным распределением напряженности электрического поля, для сферической частицы с диэлектрической проницаемостью ε определяется по выражению

$$F_E = 2\pi\varepsilon_0 a^3 \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \cdot \text{grad} E^2. \quad (7)$$

Оценка соотношения между кулоновской силой и силой, возникающей из-за неравномерного распределения напряженности, свидетельствует, что последней в большинстве практических случаев можно пренебречь [1,3].

Сила электрического ветра $F_{эл.в}$. Электрический ветер в поле коронного разряда обусловлен передачей кинетической энергии ионов при соударении с молекулами воздуха. Электрический ветер, выравнивая концентрацию ионов и взвешенных частиц в поле электрокопильной установки, оказывает значительно большее влияние на мелкие частицы, чем на крупные. Скорость уноса электрическим ветром частиц радиусом 1 мкм может быть больше скорости их движения под влиянием электрического поля; для крупных частиц ($R > 50 \text{ мкм}$) влияние электрического ветра на скорость движения незначительно. Учитывая то, что влияние электрического ветра на движение мелких частиц имеет место только на небольшом удалении от корони-

рующих электродов, а в непосредственной близости от плоских осадительных электродов (рыбы) оно ничтожно мало, влиянием электрического ветра на процесс осаждения частиц в электрокопильной установке можно пренебречь.

Сила сопротивления среды F_c . В воздухе при обычных атмосферных условиях сила сопротивления среды оказывает существенное влияние на движение частицы и определяет установившуюся скорость ее движения. Данная сила зависит от размеров частицы, скорости ее движения, а также от вязкости среды.

При малых значениях числа Рейнольдса ($Re < 5$), т.е. в случае достаточно медленного движения частиц малого размера, сила сопротивления среды движению частиц выражается формулой Стокса [3];

$$F_c = 6\pi\mu a V, \quad (8)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости воздушной среды;

V – скорость дрейфа частиц под действием поля у осадительных электродов.

Для частиц малого размера необходимо учитывать поправку к Формуле Стокса, вычисленную Кенин-гемом [3]:

$$F_c = 6\pi\mu a V \cdot \left(1 + \frac{Al_m}{a}\right), \quad (9)$$

где l_m – эквивалентная длина свободного пробега молекул;

A – постоянная зависящая от свойств поверхности частицы.

Из рассмотренных выше сил основными силами, действующими в электрокопильной установке на движущиеся заряженные частицы, являются кулоновская сила и сила сопротивления среды. Поэтому при расчетах движения заряженных частиц практически достаточно учитывать силу электрического поля, которая уравнивается силой сопротивления среды. Приравнявая правые части уравнений (6) и (9), получим

$$V = \frac{Eq}{6\pi\mu a} \cdot \left(1 + A \cdot \frac{l_m}{a}\right). \quad (10)$$

Анализ (10) показывает, что одним из основных путей интенсификации процесса осаждения частиц в электрокопильной установке является увеличение электрической силы F_k , которая зависит от напряженности электрического поля E и величины заряда частиц q .

Величина напряженности электрического поля ограничена электрической прочностью межэлектродного промежутка и зависит от технических характеристик источника высокого напряжения, а также геометрических размеров копильной камеры. Поэтому целесообразно изучить возможность повышения напряженности электрического поля в зоне осаждения электрокопильной установки с целью интенсификации процесса осаждения частиц аэрозоля.

3. Осаждение и поведение заряженных частиц на продукте зависит от ряда факторов: проводимости и размера частиц, скорости потока, температуры и влажности, состояния поверхности рыбы и др.

Осаждение копильного препарата на поверхности рыбы сопровождается растеканием капли на поверхности электрода (рыбы). Частицы копильной жидкости после осаждения нейтрализуются и сливаются в одну общую массу, и проникновение коптящих веществ в рыбу происходит диффузионным путем.

В первой стадии процесса осаждения частицы, попавшие на электрод, еще не образуют сплошного слоя и располагаются далеко друг от друга. В этот момент частица удерживается на электроде силами, получившими название сил адгезии (прилипания). Частица остается на электроде и не будет вовлечена обратно в поток, если отрывающие силы, обусловленные действием различных факторов (вибрация электрода, гидродинамическое воздействие потока воздуха и т.п.), оказываются меньше сил адгезии.

На второй стадии процесса осаждения еще нет сплошного слоя, но в то же время уже необходимо учитывать взаимное влияние частиц. Процесс этот практически не изучен, поэтому в данной работе рассматриваться не будет.

На третьей (заключительной) стадии процесса осаждения частицы копильного препарата покрывают обрабатываемый продукт (электрод) сплошным слоем, который может рассматриваться как однородная структура.

Адгезия частиц вызывается целым рядом факторов – это молекулярное взаимодействие, капиллярные и электрические силы. Адгезия характеризуется числом адгезии γ_F , равным отношению числа частиц N данного размера, оставшихся на продукте (электроде) после воздействия отрывающей силы F , к первоначальному числу частиц N_0 , т.е.

$$\gamma_F = \frac{N}{N_0}. \quad (11)$$

Адгезия частиц копильного препарата к поверхности обрабатываемого продукта в электрическом поле превышает адгезию при свободном оседании. Частица, достигнув поверхности электрода, может отдать свой заряд или даже приобрести заряд электрода. Подобные процессы происходят также при аутогезии частиц к слою уже ранее осажденной копильной жидкости и определяются дополнительной электрической силой. Эта сила зависит от удельного сопротивления слоя копильной жидкости и может быть выражена уравнением

$$F_{\text{эд}} = \left(\frac{\varepsilon_0}{2} \right) \cdot \left(\left(\frac{I \rho_{\text{кп}} \varepsilon_1}{\varepsilon_0} \right)^2 - E^2 \right), \quad (12)$$

где $F_{\text{эд}}$ — дополнительная электрическая сила, отнесенная к 1 см² осажденной поверхности;

$\varepsilon_0, \varepsilon_1$ — диэлектрические проницаемости среды и копильной жидкости;

E — градиент потенциала электрического поля в окружающей среде, кВ/см;

I — плотность тока;

$\rho_{\text{кп}}$ — удельное сопротивление слоя копильного препарата.

Если $E < \frac{I \rho_{\text{кп}} \varepsilon_1}{\varepsilon_0}$, то $F_{\text{эд}} > 0$;

Если $E > \frac{I \rho_{\text{кп}} \varepsilon_1}{\varepsilon_0}$, то $F_{\text{эд}} < 0$.

При положительном значении $F_{\text{эд}}$ происходит адгезия, при отрицательном — удаление частиц копильного препарата с поверхности обрабатываемого продукта. Величина $F_{\text{эд}}$ при прочих равных условиях определяется удельным сопротивлением слоя копильной жидкости.

Попав на поверхность продукта, копильные компоненты проникают внутрь продукта благодаря диффузии и происходит сложный биохимический процесс копчения.

Выводы

1. Существующие способы электрокопчения бездымным способом различаются в зависимости от способа зарядки частиц (капель) копильного препарата и связанной с этим величиной их заряда.
2. На величину заряда отдельной частицы (капли) копильного препарата влияют параметры установки (H, r, U_k), технологический режим (U) и свойства материала копильного препарата (ε, ρ_v).
3. Одним из основных путей интенсификации процесса электростатического копчения является увеличение электрической силы F_k , которая зависит от напряженности электрического поля E и величины заряда частиц q .

Литература

1. Воскресенский Н.А., Логунов Л.Л. Технология рыбных продуктов. — М.: Пищевая пром-сть, 1968. — 424 с.
2. Мезенова О.Я., Ким И.Н., Бредихин С.А. Производство копченых пищевых продуктов. — М.: Колос, 2001. — 208 с.
3. Левитов В.И., Решидов И.К., Ткаченко В.М. Дымовые электрофилтры. — М.: Энергия, 1980. — 448 с.
4. Абдрафиков С.Н., Селунский В.В. Производство рыбопродуктов. — Челябинск: Изд-во ЧГАУ, 2002. — 280 с.
5. Рыба и рыбные продукты. Рыба копченая, вяленая и сушеная // Государственные стандарты. — М.: Изд-во стандартов, 1997. — 154 с.

