

К ВОПРОСУ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЕТРА НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В НАГРЕВАТЕЛЕ

Заяц Е.М., д.т.н., проф., Чорный А.Д., к.ф.-м.н., доцент,
Дубодел И.Б., к.т.н., доцент, Кривовязенко Д.И.

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет», Институт тепло-массообмена имени А.В. Лыкова,
г. Минск, РБ*

Одним из наиболее эффективных способов интенсификации теплоперевода от поверхности нагревателя к окружающей среде является увеличение скорости движения среды. Для этого нагреватель оснащают вентилятором, который значительно увеличивает теплоперенос, но создает шум и дополнительное потребление электроэнергии.

Электрический ветер возникает вследствие ионизации молекул воздуха и ускорения их движения силами электрического поля. Это происходит при ионизации воздуха в поле коронного разряда. Следовательно, совмещение ионизации и подогрева воздуха электрическим током в одном устройстве может интенсифицировать теплоперенос от нагревателя к воздушной среде.

Цель настоящей работы – определить исходные положения, описывающие перенос заряженных молекул (ионов) воздуха в электрическом поле и на основании которых предварительно оценить влияние электрического ветра на расход воздуха через нагреватель.

Перенос ионов (заряженных молекул воздуха) осуществляется четырьмя механизмами – электропроводностью через воздух, миграцией ионов в воздухе, конвекцией потоком воздуха и диффузией. Уравнение баланса полного тока, записанное для объемной плотности ρ_e ионов, включает вклад вышеупомянутых механизмов переноса [1]:

$$\frac{\partial j_k}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\sigma E_k + \gamma \rho_e E_k + \rho_e V_k - D_e \frac{\partial \rho_e}{\partial x_k} \right) = 0, \quad (1)$$

где σ – удельная проводимость, См/м; V_k – компоненты вектора скорости, м/с; γ – подвижность ионов в воздухе, м²/(В·с).

Током проводимости σE_k в (1) можно пренебречь, поскольку электрическая проводимость воздуха мала ($\sigma = 1.61 \cdot 10^{-23}$ См/м при комнатной температуре).

Миграция ионов в воздухе $\gamma\rho_e E_k$ обусловлена их подвижностью γ и диффузией D_e и зависит от температуры согласно формуле Нернста-Эйнштейна:

$$\gamma = \frac{FD_e}{R_g T}, \quad (2)$$

где T – температура, К; $F = 96487$ Кл/моль – число Фарадея; R_g – универсальная газовая постоянная ($R_g = 8,314472$ Дж/(моль·К)).

Коэффициент диффузии ионов [1, 2]:

$$D_e = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{8R_g T}{\pi M}} \frac{k_B T}{\sqrt{2\pi} d_M^2 p}, \quad (3)$$

где k_B – постоянная Больцмана ($k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); d_M – эффективный диаметр иона, м; M – молярная масса иона, г/моль; p – давление, Па.

Допуская, что для воздуха справедливо уравнение состояния совершенного газа

$$p = \rho \frac{R_g T}{M_a} \quad (4)$$

зависимость (3) будем использовать в виде:

$$D_e = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{4}{\pi M R_g}} \frac{k_B M_a \sqrt{T}}{\pi d_M^2} \frac{\sqrt{T}}{\rho} = C_0^* \frac{\sqrt{T}}{\rho}, \quad (5)$$

где M_a – молярная масса воздуха, равная 29 г/моль для сухого воздуха.

Последние формулы позволяют оценить относительный вклад в перенос миграции и диффузии. Оценим зависимость коэффициента диффузии и подвижности от температуры в предполагаемом диапазоне температур. Примем коэффициент диффузии ионов равным коэффициенту диффузии молекул кислорода в воздухе (для кислорода $M = 32$ г/моль, примем $d_M = 0,36$ нм). При комнатной температуре ($T = 291,15$ К) и нормальном давлении ($p = 1,013 \cdot 10^5$ Па), согласно формуле, коэффициент диффузии $D_e = 1,008276 \cdot 10^{-5}$ м²/с, когда как при $T = 373$ К уже $D_e = 1,462 \cdot 10^{-5}$ м²/с (изменение почти на 50%). Тогда подвижность ионов согласно формуле (2) $\gamma = 4,02 \cdot 10^{-4}$ м²/(В·с) при $T = 291,15$ К, в свою очередь $\gamma = 4,55 \cdot 10^{-4}$ м²/(В·с) при $T = 373$ К. Как видно подвижность ионов гораздо медленнее меняется с температурой и может быть принята

постоянной. Коэффициент диффузии гораздо меньше по значению подвижности и вклад диффузионного переноса мал в уравнении (1).

Таким образом, перенос ионов осуществляется преимущественно двумя механизмами – миграцией и конвекцией, создающими электрический ветер под действием электрического поля. Оценим вклад токов электроконвекции в ускорение ионов воздуха на основе уравнений электрогидродинамики [1] при допущении отсутствия заметных потенциальных течений (в этом случае градиентами давления можно пренебречь). Ограничиваясь качественным рассмотрением задачи на основе принципов размерностей, свяжем неизвестные параметры (прежде всего скорость, сила, действующая на ионы) с фиксируемыми параметрами – приложенным напряжением U и протекающим при этом током I при характерном линейном параметре системы L (например, длиной, пропорциональной расстоянию между электродами, рис.1, б). Тогда оценкой для тока I и напряжения U является:

$$I = jL^2, \quad U = EL. \quad (6)$$

Уравнение для напряженности электрического поля аппроксимируется как:

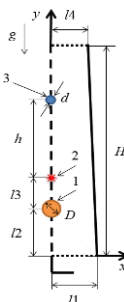
$$\frac{\varepsilon E}{L} = \rho e. \quad (7)$$

Уравнение переноса импульса может быть представлено как:

$$\frac{\rho V^2}{L} = -\mu \frac{V}{L^2} + \rho e E. \quad (8)$$



а



б

Рисунок 1 – Фотография ионотерма (а) и расчетная область вертикального плоского канала (б) к постановке задачи

В нагревателе обычно реализуется ламинарный режим движения. Для случая ламинарных потоков ($\rho V^2/L \ll \mu V/L^2$, т. е. число Рейнольдса $Re = \rho VL/\mu \ll 1$) уравнения (6)–(8) приводят к следующему соотношению для скорости электрического ветра:

$$V = \frac{\varepsilon}{\mu} E^2 L = \frac{\varepsilon U^2}{\mu L}, \quad (9)$$

для тока электроконвекции

$$j = \frac{\varepsilon U^2}{L^3} \left(\gamma + \frac{\varepsilon U}{\mu} \right). \quad (10)$$

Для тока имеем соотношение $I = \frac{\varepsilon U^2}{L} \left(\gamma + \frac{\varepsilon U}{\mu} \right)$, которое указывает, что ток растет пропорционально кубу напряжения. Тогда для ламинарного течения характерные значения для длины зоны интенсивного электрического ветра:

$$L = \frac{\varepsilon U^2}{I} \left(\gamma + \frac{\varepsilon U}{\mu} \right), \quad (11)$$

$$\text{для скорости } V = \frac{\varepsilon U^2}{\mu L} = \frac{I}{(\gamma\mu + \varepsilon U)}, \quad (12)$$

для силы электрического поля, действующей на ион:

$$f = \rho_e E = \frac{(\mu I)^3}{\varepsilon^2 U^4 (\gamma\mu + \varepsilon U)^3}. \quad (13)$$

Последние три соотношения позволяют оценить силу f , которая на пути L может ускорить ионы до скорости $V_{new} = V_{init} + V$ относительно первоначальной V_{init} . При токе $I = 1$ мкА и приложенном напряжении 15 кВ скорость согласно (12) может достичь 7 м/с, что увеличит расход воздуха на 0,175 м³/с при длине 500 мм и ширине 50 мм нагревателя.

Наши исследования опытного образца (рис.1,а) показали, что совмещение ионизации и нагрева увеличивает расход воздуха через нагреватель, в следствие образования ионного ветра, на 15...20 %.

Литература

1. Жакин А. И. Электродинамика. УФН. 2012. Т. 182. С. 495–520.

2. Melcher J. R. Continuum Electromechanics. Cambridge, MA: MIT Press, 1981. 635 p.

ЭЛЕКТРОСТИМУЛЯЦИЯ СЕМЯН МОРКОВИ

Самарин Г.Н., д.т.н., доц., А.Н. Павлов, к.т.н., доц.,
В.А. Румянцев, ассистент, З.А. Семенова, ассистент
ФГБОУ ВО «Великолукская государственная сельскохозяйственная академия», г. Великие Луки, РФ

Очень важным звеном в сельскохозяйственном производстве, является повышение урожайности сельскохозяйственных культур. С этой целью проводится большая работа по совершенствованию целого ряда агротехнических мероприятий. Центральным звеном в этом ряду занимает проблема семеноводства.

Семена – носители биологических и хозяйственных свойств растений, в решающей степени определяют качество и количество получаемого урожая. Сельскохозяйственное производство предъявляет к семенам определенные требования, установленные государственными стандартами [1].

Производство семян включает ряд технологических операций: послеуборочное хранение, предпосевная обработка, обеззараживание, посев. На каждой стадии производства и хранения на семена возможно негативное влияние природно-климатических и хозяйственных факторов, которые снижают их качество. При неудовлетворительных условиях хранения или выращивания, семена теряют естественную всхожесть, заражаются болезнями, повреждаются насекомыми-вредителями, травмируются при механической обработке. Специалисты сельскохозяйственного производства и ученые постоянно ищут способы и средства для повышения посевных качеств семян [2].

В последние годы для интенсификации растениеводства в практику сельского хозяйства стали внедрять электротехнологические методы воздействия на растения и семена зерновых и овощных культур с целью их стимуляции – ускорения роста, повышения урожайности и улучшения качества получаемой продукции [1].

Установлено, что электрический ток и электрофизические применения и методы в целом способны воздействовать на раститель-