

УДК 537.565

## **Численное моделирование и оптимизация ионного охладителя с пластинчато-игольчатыми электродами\***

**Ц. Цай, Ч. Ван, Я. Ху**

*Гуандунский технологический университет, Гуандун, Китай*

E-mail: wangchgdut@163.com

В работе исследуются характеристики электрического поля, поля течения и температурного поля ионного охладителя. Результаты показывают, что наилучшие характеристики охладителя достигаются при отношении расстояния между пластинами к их толщине, равном 5, расстоянию между электродами 5 мм и при «нулевом» положении иглы. Авторами предложена и оптимизирована двухступенчатая конструкция ионного охладителя, в которой средняя скорость ионного ветра увеличилась по сравнению с одноступенчатой конструкцией на 30,8 % — т.е. до 3,57 м/с. Результаты исследования расширяют существующие знания о возможных конфигурациях электродов в ионных охладителях и способствует практическому применению этих устройств.

**Ключевые слова:** ионный ветер, численное моделирование, охладитель, оптимизация.

### **Введение**

В процессе непрерывной миниатюризации новых электронных изделий мощность и плотность теплового потока в этих устройствах продолжает расти, что создает большие проблемы при их охлаждении [1, 2]. В настоящее время наиболее часто применяемый метод повышения теплоотдачи в электронных устройствах заключается в использовании механических вентиляторов для принудительного воздушного охлаждения. Однако большие размеры механического вентилятора затрудняют его работу в малом пространстве, а решение проблемы вибрации и шума движущихся частей вентилятора оказывается непростой задачей [3–5]. Ионное охлаждение как новая технология воздушного охлаждения привлекает большое внимание. Генератор ионного ветра представляет собой устройство с небольшой и гибкой структурой [6–8]. Для создания воздушного потока ему нужен только крошечный наконечник. Такое устройство можно применять в особых случаях — в небольшом пространстве, что соответствует тенденции все большей

---

\* Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку исследования международными научно-техническими проектами района Хуанпу города Гуанчжоу (2019GH02) и Национального фонда естественных наук Китая (51676049).

миниатюризации электронного оборудования. Кроме того, по сравнению с механическим вентилятором, ионные охладители обладают меньшим энергопотреблением и пониженным шумом из-за крайне малого рабочего тока и отсутствия движущихся частей [9–11].

Недавние исследования показали, что во многих практических приложениях технология ионного охлаждения может обеспечить лучшую производительность охладителей [12–15]. Однако существует очень тесная связь между характеристиками ионного охладителя и его структурными параметрами [16–18]. Для выявления этой связи и усиления ионного ветра исследовались ионные генераторы воздушных потоков с различным расположением электродов [10, 17, 19–21]. Для дальнейшего изучения технологии ионного ветра, включающей взаимодействие нескольких физических полей, очень важно создание точной математической модели для предсказания пространственного распределения заряда, скорости потока, коэффициента теплопередачи и других параметров ионного охладителя [22–25]. Гипотеза о том, что при малых числах Рейнольдса течения в канале основную роль играют электрогидродинамические (ЭГД) явления, была подтверждена авторами [24]. В работе [26] сообщалось, что явление электротермической конвекции, вызванное монополярной инжекцией ионов в диэлектрическую жидкость между двумя параллельными пластинами, можно изучать путем применения решеточной модели Больцмана для решения сопряженных уравнений ЭГД-модели. В исследовании [27] было показано, что изготовленные с помощью микрофабрикации ионные насосы могут после оптимизации обеспечить коэффициент теплопередачи до  $3200 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$  при коэффициенте полезного действия до 47. В работе [20] была предложена двумерная модель электростатического воздушного ускорителя пластинчатого типа с непараллельным расположением проводов. Результаты показали, что на электрический ток влияет наличие разряда, а на скорость потока оказывает влияние эффект всасывания. Для сравнения набегającego потока ускорителя и равномерного струйного течения в работе [28] была разработана трехмерная расчетная модель электростатических ускорителей игольчато-кольцевого типа. Авторами был усовершенствован крупногабаритный ионный насос, состоящий из множества одиночных правильных шестигранных игольчато-кольцевых ионных генераторов течения, с максимальной средней скоростью ветра, на 13,3 % превышающей таковую в исходной модели [17].

Многие исследователи занимаются численным моделированием ионных охладителей, однако численных исследований пластинчато-игольчатых и сетчато-игольчатых структур недостаточно, поскольку приемные электроды таких структур в модели обычно состоят из набора элементов и в процессе моделирования разряда может возникать искажение электрического поля, что приводит к отсутствию сходимости решения и значительно увеличивает сложность расчета. Кроме того, поскольку пластинчато-игольчатые конструкции могут включать пластины и коллекторный электрод (именно такая конфигурация перспективна для изготовления и оптимизации ионных охладителей), представляется важным их дальнейшее изучение. Таким образом, для исследования характеристик электрического поля, поля потока и температурного поля, которые трудно измерить экспериментально, а также в целях облегчения последующей оптимизации в настоящей статье рассматривается разработанная авторами двумерная численная модель пластинчато-игольчатого и сетчато-игольчатого ионных охладителей. В соответствии с оптимальными значениями конструктивных параметров, полученными методом ортогонального экспериментального конструирования, предложена и оптимизирована двухступенчатая

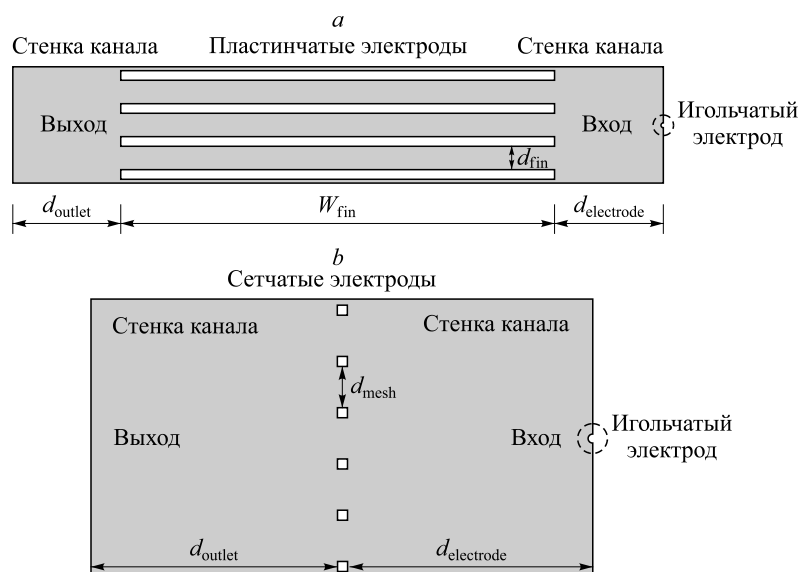


Рис. 1. Двумерная модель ионного охладителя для пластинчато-игольчатого (a) и сетчато-игольчатого (b) типов.

структура ионного охладителя. Результаты, представленные в статье, могут обогатить знания о способах анализа конфигураций электродов и способствовать промышленной разработке устройств с ионным ветром.

## 1. Основные уравнения

Как показано на рис. 1, в качестве двумерной расчетной области выбрано центральное продольное сечение игольчатого электрода из трехмерной модели [10]. Двумерное моделирование позволяет достаточно эффективно провести расчеты и определить связи между всеми физическими полями. Значения параметров модели приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения для двумерной модели, принятые по умолчанию

| Параметр             | Физический смысл                      | Значение                                  |
|----------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|
| $W_{\text{channel}}$ | Ширина прямоугольного канала          | 30 мм                                     |
| $H_{\text{channel}}$ | Высота прямоугольного канала          | 6 мм                                      |
| $W_{\text{fin}}$     | Ширина пластинчатого электрода        | 20 мм                                     |
| $H_{\text{fin}}$     | Высота пластинчатого электрода        | 0,5 мм                                    |
| $d_{\text{fin}}$     | Расстояние между пластинами           | 1,2 мм                                    |
| $W_{\text{mesh}}$    | Толщина сетчатого электрода           | 0,2 мм                                    |
| $d_{\text{mesh}}$    | Шаг сетки сетчатого электрода         | 1,2 мм                                    |
| $r$                  | Радиус кривизны излучающего электрода | 0,01 мм                                   |
| $E_0$                | Напряженность поля пробоя             | $3,23 \cdot 10^{-6}$ В/м                  |
| $\mu_E$              | Подвижность ионов                     | $2,1 \cdot 10^{-4}$ м <sup>2</sup> /(В·с) |
| $\rho$               | Плотность воздуха                     | 1,23 кг/м <sup>3</sup>                    |
| $\mu$                | Аэродинамическая вязкость             | $1,8 \cdot 10^{-5}$ (Н·с)/м <sup>2</sup>  |

### 1.1. Уравнения, описывающие коронный разряд

Решаемые математические уравнения включают закон Гаусса, уравнение Пуассона, уравнение непрерывности тока, выражение для плотности тока и уравнение переноса заряда.

Закон Гаусса, записанный в виде

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho_q / \varepsilon_0, \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V, \quad (2)$$

позволяет получить уравнение Пуассона:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = -\nabla^2 V = \rho_q / \varepsilon_0, \quad (3)$$

$$\varepsilon_0 \nabla^2 V = -\rho_q. \quad (4)$$

Уравнение непрерывности тока и выражение для его плотности определяются как

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0, \quad (5)$$

$$\mathbf{J} = z_q \mu_E \rho_q \mathbf{E} + \rho \mathbf{u}. \quad (6)$$

Объединив уравнения (5) и (6), получим следующее уравнение переноса заряда:

$$\mu_E \left( \rho_q^2 / \varepsilon_0 - \nabla V \cdot \nabla \rho_q \right) + \nabla \rho_q \cdot \mathbf{u} = 0. \quad (7)$$

С целью проверки достоверности подаваемого на электрод напряжения плотность объемного заряда  $\rho_q$  излучающего электрода в уравнении (7) определяется по правилу множителей Лагранжа. При этом для того, чтобы предсказываемое значение объемного заряда было ближе к действительному, в качестве эталона испытаний используется формула Пика.

Предполагается, что подвижность ионов  $\mu_E$  в электрическом поле постоянна. В качестве граничных условий для уравнения Пуассона используется нормальная составляющая вектора электрического поля, приложенного к излучающему электроду:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{E} = E_0. \quad (8)$$

Как указывалось выше, чтобы прогнозируемое значение пространственного заряда было ближе к фактической величине, для получения эталонного значения используется формула Пика:

$$E_0 = 3 \cdot 10^6 \delta \left( 1 + \frac{0,03}{\sqrt{\delta r_i}} \right), \quad (9)$$

где  $E_0$  — пороговое значение электрического поля для пробоя,  $\delta$  — числовая плотность частиц воздуха при стандартных условиях,  $r_i$  — радиус излучающего электрода.

### 1.2. Уравнения для течения воздуха

Гидродинамический механизм стационарной модели несжимаемого газа в электростатическом поле описывается уравнением Навье–Стокса и уравнением неразрывности:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (10)$$

$$\rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \left[ -pI + \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right] + \mathbf{F}_{\text{EHD}}, \quad (11)$$

где  $\mathbf{u}$  — скорость воздуха,  $\mu$  — динамическая вязкость,  $\rho$  — плотность воздуха,  $p$  — давление,  $\mathbf{F}_{\text{EHD}}$  — член, описывающий объемную силу в уравнении Навье–Стокса.

В настоящей модели под  $F_{\text{ЕНД}}$  подразумевается сила, действующая со стороны электрического поля:

$$F_{\text{ЕНД}} = \rho_q E. \quad (12)$$

### 1.3. Уравнение теплопереноса

Закон сохранения энергии записывается в виде уравнения

$$\nabla(\mathbf{u} \rho c_p T) = \nabla(\lambda \nabla T) + Q_j, \quad (13)$$

где  $\mathbf{u}$  — скорость воздушного потока,  $\rho$  — плотность воздуха,  $c_p$  — удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $T$  — температура источника тепла,  $Q_j$  — джоулево тепло.

Прямой конвективный теплоперенос между источником тепла и окружающей средой описывается выражением

$$Q = h \cdot A(T - T_0), \quad (14)$$

где  $Q$  — входной тепловой поток,  $h$  — коэффициент конвективной теплопередачи,  $A$  — площадь теплообмена,  $T$  — температура источника тепла,  $T_0$  — температура окружающей среды.

## 2. Расчетная процедура и верификация модели

Численное моделирование проводилось с помощью коммерческого программного пакета COMSOL MULTIPHYSICS, использующего метод конечных элементов. Авторами совместно решались уравнения для всех физических полей с учетом их взаимодействий. В стационарных расчетах для решения уравнения Пуассона и получения распределения потенциала в основном применялся электростатический интерфейс (es). Для решения уравнения непрерывности тока, уравнения переноса заряда и получения распределения плотности пространственного заряда и плотности тока обычно использовался интерфейс переноса заряда (ст). На первом этапе необходимо задать начальное значение пространственной плотности заряда и затем постепенно путем итерационных вычислений приблизить его к эмпирическому значению, полученному с помощью уравнения Пика. Для нахождения поля скоростей потока моделировалось течение воздуха, вызванное переносом заряда, с использованием интерфейса ламинарного течения (spf). Наконец, температурное поле при конвективном теплообмене, вызванным движением воздуха, моделировалось с использованием интерфейса теплопереноса (ht).

Для проверки независимости результатов расчета от параметров сетки использовались шесть сеток, содержащих 9694, 14366, 16658, 22828, 55074 и 136541 элементов. Как показано на рис. 2а, 2б, вблизи поверхности приемного электрода и стенки проточного канала сетка локально измельчалась. Вблизи границы излучающего электрода для измельчения сетки был выбран плазменный расщепленный режим. В качестве оценочного показателя для теста выбран ионный ветер. Можно видеть, что если число ячеек сетки превышает 55074, то приращение скорости ветра составляет менее 1 % (см. рис. 2с, 2д). Исходя из этого для модели с пластинчато-игольчатой конфигурацией используется сетка с количеством ячеек 55074. Таким же образом определялось количество ячеек, равное 25196, для модели с сетчато-игольчатой конфигурацией. В табл. 2 приведены конкретные граничные условия.

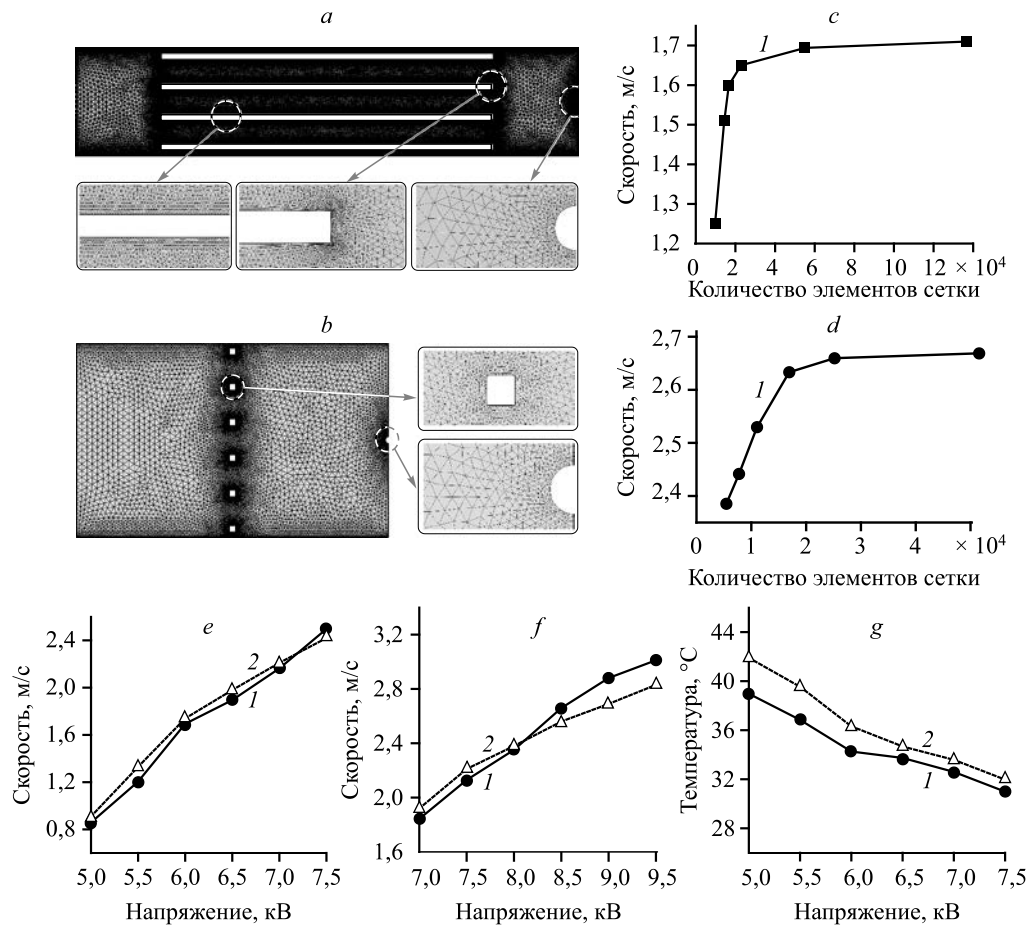


Рис. 2. Распределение плотности элементов расчетной сетки для двумерной области с пластинчато-игольчатой (а) и сетчато-игольчатой (б) структурами.

1 — кривая зависимости скорости от числа ячеек вычислительной сетки для пластинчато-игольчатой (с) и сетчато-игольчатой структур (d);  
 верификация максимальной местной скорости на выходе для пластинчато-игольчатой (e) и сетчато-игольчатой (f) структур и верификации температуры пластин (g):  
 1 — результаты моделирования, 2 — экспериментальные данные.

Принятый подход верифицируется предыдущими экспериментальными результатами и расчетами в соответствии с моделью [10]. На рис. 2e–2g видно, что данные по локальной максимальной скорости ветра и по направлению изменения температуры на выходе в основном согласуются с экспериментальными данными, а относительные ошибки составляют менее 10 %. Следовательно, модель можно считать достаточно надежной.

Таблица 2

Граничные условия, использованные в разработанной численной модели

| Граница  | Электрическое поле | Поле объемного заряда | Поле скорости | Поле температуры |
|----------|--------------------|-----------------------|---------------|------------------|
| Игла     | $V = V_0$          | $\rho = \rho_0$       | Прилипание    | Нулевой поток    |
| Пластина | Заземление         | Нулевой поток         | Прилипание    | $Q = Q_0$        |
| Сетка    | Заземление         | Нулевой поток         | Прилипание    | Нулевой поток    |
| Вход     | Нулевой заряд      | Нулевой поток         | $u = 0$       | Нулевой поток    |
| Выход    | Нулевой заряд      | Нулевой поток         | $p = p_0$     | Нулевой поток    |
| Другие   | Нулевой заряд      | Нулевой поток         | Прилипание    | $T = T_0$        |

### 3. Результаты и их обсуждение

В настоящем исследовании расстояние между электродами модели  $d = 5$  мм, что является оптимальным выбором в соответствии с предыдущей работой авторов [10]. Рабочее напряжение выбиралось из диапазона экспериментальных значений. Основными исследуемыми величинами являются распределение электрического потенциала, распределение плотности объемного заряда, поле скоростей и распределение температур.

#### 3.1. Электрическое поле

Как показано на рис. 3а–3с, распределение электрического потенциала для пластинчато-игольчатой модели определяется уравнением Пуассона и электрический потенциал постепенно и равномерно уменьшается до нуля от игольчатого к пластинчатому электроду. Последнее означает, что распределение потенциала от входа до выхода пластинчатого электрода является постоянным.

На рис. 3d–3f показано распределение плотности объемного заряда для пластинчато-игольчатой модели. Видно, что плотность объемного заряда растет с ростом напряжения и её максимальное значение увеличивается от  $1,5 \cdot 10^{-3}$  до  $11 \cdot 10^{-3}$  Кл/м<sup>3</sup>. Объемные заряды, образующиеся после ионизации воздуха, распределяются непрерывно в области короны ионного ветра, затем заряды и носители диффундируют в область ионного дрейфа в виде электронного облака, далее носители полностью диффундируют и образуют область объемного заряда. До некоторой степени плотность объемного заряда отражает пропускную способность ионного заряда. В отличие от распределения электрического потенциала, распределение пространственного заряда имеет явно эллиптическую форму: плотность заряда в горизонтальном направлении на кончике игольчатого электрода значительно выше, чем у стенки рабочего канала.

Как видно на рис. 3g–3j, тенденции в распределении электрического потенциала для сетчато-игольчатой и пластинчато-игольчатой моделей в основном совпадают, но напряжение в сетчато-игольчатой модели является более высоким, что согласуется с данными работы [10]. Объемный заряд увеличивается с ростом напряжения, а скорость потока воздуха в зоне дрейфа ионов ограничивается их концентрацией. Из-за инерционного воздействия ионного ветра на объемный заряд плотность последнего в сетчато-игольчатой модели распределяется за сетчатым электродом.

#### 3.2. Поле течения

На рис. 4a–4c приведено распределение скорости ионного ветра в пластинчато-игольчатом охладителе при различных напряжениях. Во всех случаях наибольшая локальная скорость ветра создается в области дрейфа ионов между электродами. В этой области ионный ветер сильно возмущает воздух, и на входе в пластинчатый электрод образуется закрученный поток. Это видно из характеристик электрического поля. После того как ионный ветер проникает в канал между пластинами, его скорость сильно уменьшается из-за потери ускорения, создаваемого электрическим полем. Центральный канал, обращенный к концу излучающего электрода, является основным каналом, по которому движется поток ионного ветра, а скорость потока в двух других каналах относительно мала.

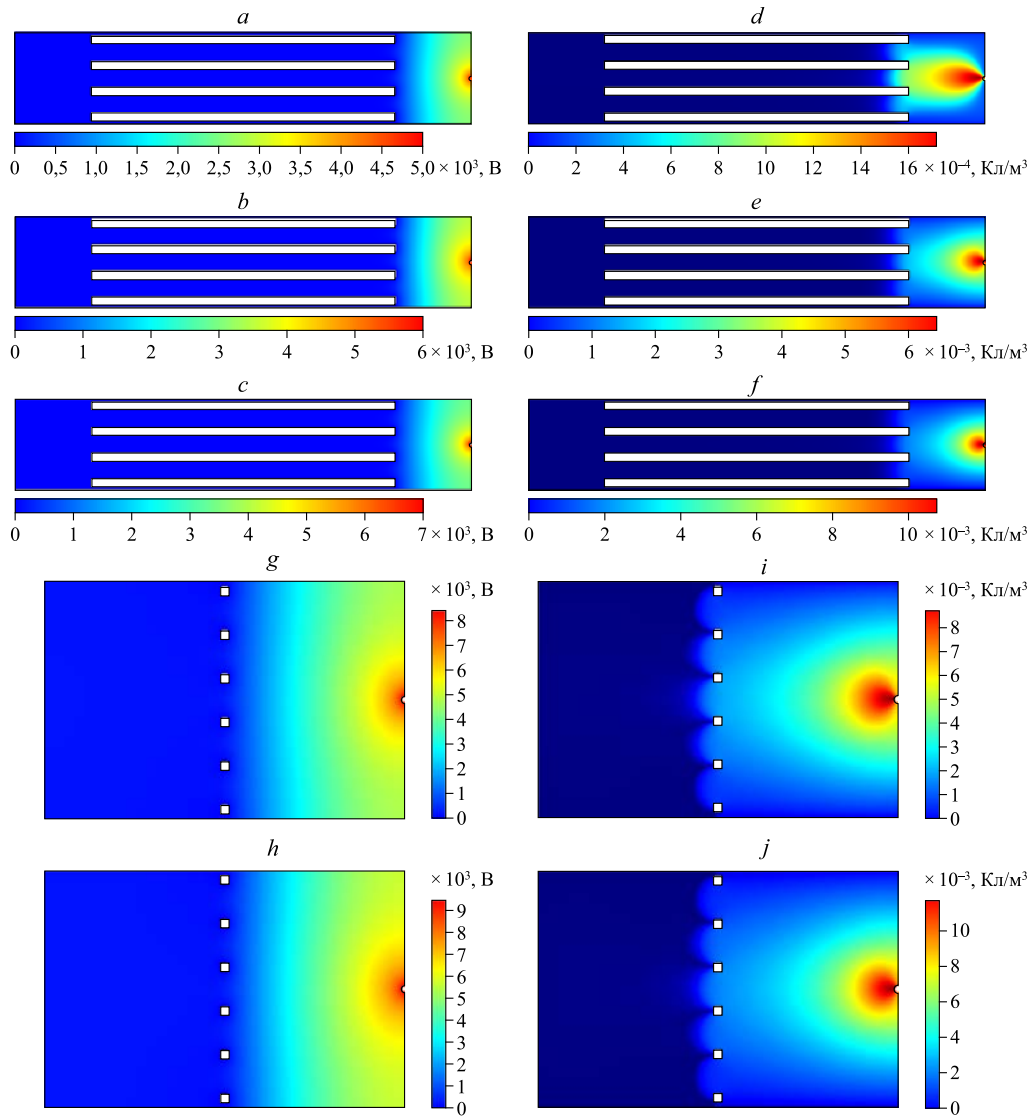


Рис. 3. Электрический потенциал для пластинчато-игольчатой модели: 5 (a) 6 (b) 7 (c) кВ;  
 плотность объемного заряда в пластинчато-игольчатой модели: 5 (d), 6 (e), 7 (f) кВ;  
 электрический потенциал для сетчато-игольчатой модели: 8,5 (g), 9,5 (h) кВ;  
 плотность объемного заряда в сетчато-игольчатой модели: 8,5 (i), 9,5 (j) кВ.

В горизонтальном направлении ускорение ионного ветра, создаваемое игольчатым электродом по направлению к параллельным пластинчатым электродам, максимально. Под действием кулоновской силы ионы сталкиваются с молекулами воздуха внутри канала и обмениваются импульсом, образуя устойчивый ионный ветер. В других направлениях (в двух других каналах) из-за совместного действия кулоновской силы и вязкого сопротивления стенки формирование концентрированного воздушного потока затруднено. Но ионный охладитель обычно имеет несколько игольчатых электродов, поэтому он все равно хорошо рассеивает тепло.

При напряжении 5 кВ максимальная локальная скорость на выходе составляет 0,9 м/с. Воздушный поток концентрируется в горизонтальном направлении конечного электрода, в некотором количестве он также присутствует по обе стороны выходного отверстия.

Указанное напряжение соответствует начальной стадии работы ионного ветра генератора, эффект ионизации при этом является относительно слабым. При напряжении 7 кВ вихревая линия тока, образующаяся в области дрейфа ионов, в принципе соответствует таковой при 6 кВ, а максимальная локальная скорость близка к 7 м/с. В то же время максимальная локальная скорость на выходе составляет 2,46 м/с, при этом турбулентность на выходе более заметна. Скорость потока значительно увеличивается не только в центральной области, и скорость ветра на выходе становится более равномерной.

Как показано на рис. 4d–4e, распределение скорости ветра на выходе из сетчато-игольчатой модели является более сложным. Так как ионная струя способна проходить через принимающий сетчатый электрод, то поток воздуха не приводит к накоплению ионов на входе сетчатого электрода. В этом случае сохраняется область с высокой скоростью. Около стенок канала скорость потока больше, и средняя скорость ветра на выходе повышается. При рабочем напряжении 8,5 кВ максимальная локальная скорость ветра в зоне дрейфа ионов превышает 5 м/с, а максимальная скорость ветра на входе составляет 2,66 м/с. При рабочем напряжении 9,5 кВ максимальная локальная скорость ветра в зоне дрейфа ионов превышает 6 м/с, а максимальная скорость ветра на входе составляет 3,01 м/с.

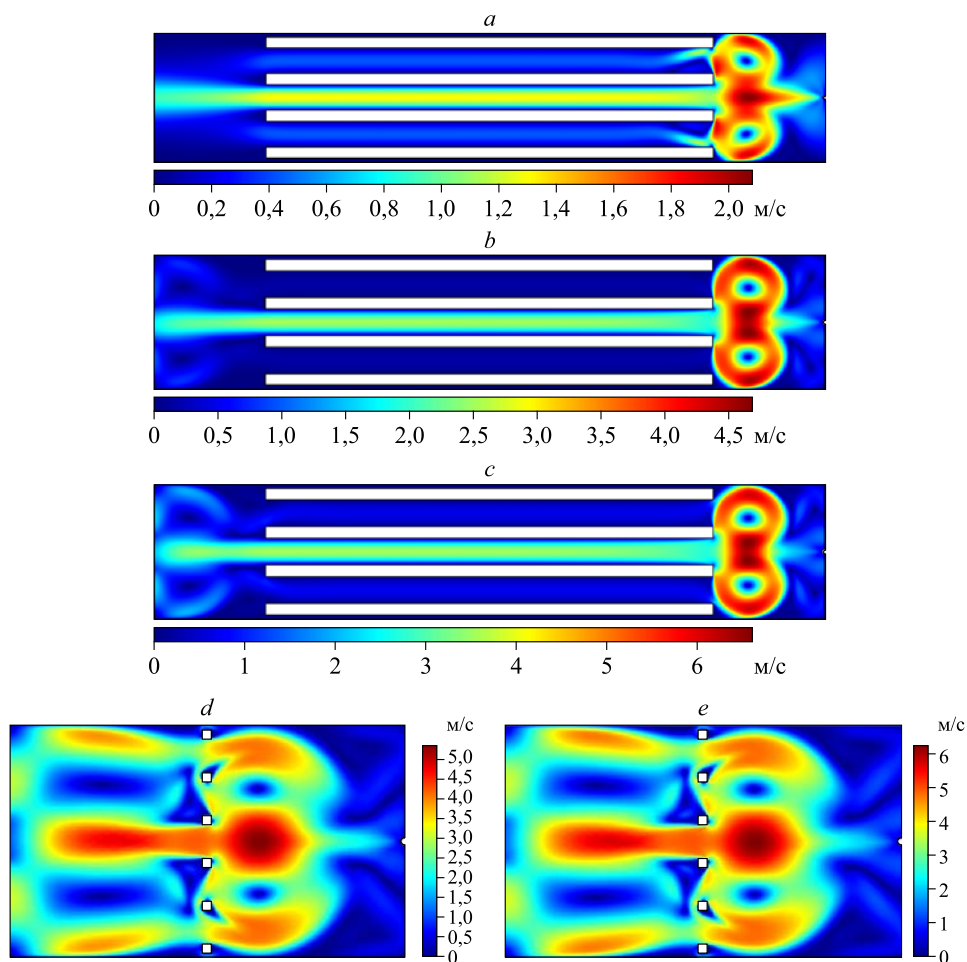


Рис. 4. Распределение скорости в пластинчато-игольчатой модели (5 (a) 6 (b) 7 (c) кВ) и в сетчато-игольчатой модели (8,5 (d), 9,5 (e) кВ).

### 3.3. Поле температуры

Из рис. 5 видно, что при увеличении рабочего напряжения скорость ионного ветра и мощность конвективного теплообмена увеличиваются, но средняя температура поверхности пластин уменьшается. Следует отметить также разницу в теплоотдаче пластин, что связано с неравными скоростями ветра в пластинчато-игольчатой модели. Видно, что коэффициент конвективной теплопередачи в области основного потока больше, а температура поверхности пластины ниже. Локальное накопление тепла происходит на входе в верхний и нижний каналы из-за низкой скорости потока. Причина состоит в том, что на входе в каналы за счет центробежной силы электрического поля и вязкого сопротивления стенки формируется вихревое течение и большая часть воздушного потока проходит через центральный канал. При полном развитии воздушного потока температура пластин в направлении выхода из проточного канала постепенно снижается. Если рабочее напряжение составляет 6 кВ, то средняя температура поверхности пластины падает до 34,3 °С. В случае, когда рабочее напряжение равно 7 кВ, средняя температура поверхности пластины падает до 32,6 °С.

## 4. Структурное исследование и оптимизация ионного охладителя

### 4.1. Влияние отношения расстояния между пластинами к их толщине ( $d_{\text{fin}}/W_{\text{fin}}$ )

В одноступенчатой конструкции отношение  $d_{\text{fin}}/W_{\text{fin}}$  отражает плотность пластинчатого электрода, которая влияет на предельную ионизационную способность электрического поля и текучесть воздуха. Как показано на рис. 6, в случае, когда отношение  $d_{\text{fin}}/W_{\text{fin}}$  равно 5, ионная струя легко проходит через канал, а ионный ветер быстро движется в верхнем и нижнем каналах. Максимальная локальная скорость ветра на выходе достигает 4,11 м/с, а средняя скорость — 2,73 м/с. В случае, когда отношение  $d_{\text{fin}}/W_{\text{fin}}$  равно 10, количество разрядов между острием иглы и краем пластины в том же диапазоне значительно снижается, а ионизационная способность острого эмиттера в электрическом поле ослабевает. Поэтому максимальная локальная скорость ветра в районе короны составляет около 5 м/с. Однако более широкое расстояние между пластинами способствует более полному развитию течения воздуха: максимальная локальная скорость

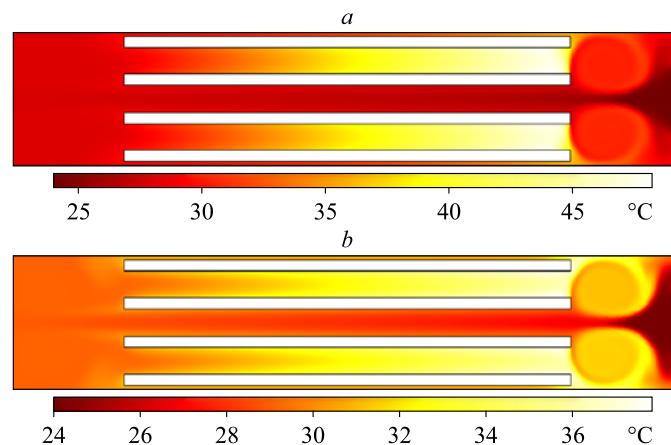


Рис. 5. Распределение температуры в пластинчато-игольчатой модели: 6 (a), 7 (b) кВ.

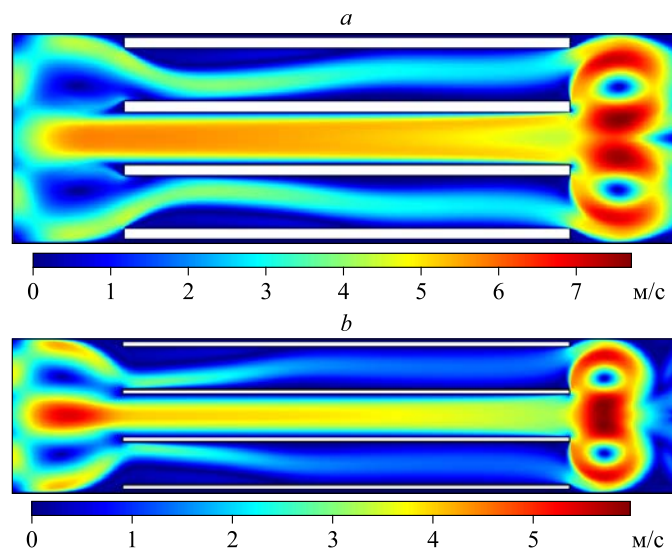
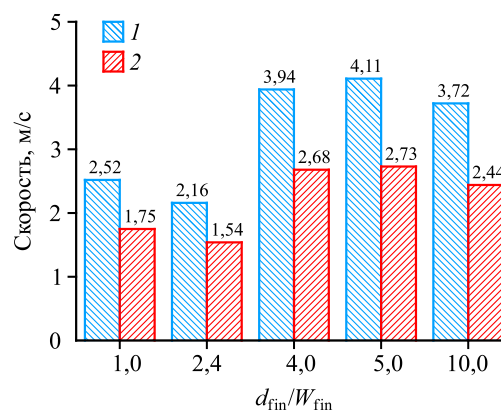


Рис. 6. Распределение скорости в сетчато-игольчатой модели при  $d_{\text{fin}}/W_{\text{fin}} = 5$  (a), 10 (b).

Рис. 7. Скорость ветра на выходе из пластинчато-игольчатой модели для различных значений  $d_{\text{fin}}/W_{\text{fin}}$  при 7 кВ. 1 и 2 — локальная и средняя скорости соответственно.

становится равной 3,72 м/с, средняя скорость — 2,44 м/с.

На рис. 7 показана скорость ветра при различных значениях отношения  $d_{\text{fin}}/W_{\text{fin}}$ . Структуре со слабым влиянием скорости ветра на выходе соответствует значение  $d_{\text{fin}}/W_{\text{fin}} = 2,4$ , для которого максимальная локальная скорость ветра на выходе составляет 2,16 м/с, а средняя скорость — 1,54 м/с. Когда отношение  $d_{\text{fin}}/W_{\text{fin}} > 4$ , скорость ветра заметно увеличивается. Структура с наиболее выраженным влиянием скорости ветра на выходе соответствует значению  $d_{\text{fin}}/W_{\text{fin}} = 5$ . При этом в ионном охладителе достигается хороший баланс между предельной ионизирующей способностью электрического поля и текучестью воздуха.



#### 4.2. Влияние расстояния между электродами

На основе рассмотренных выше параметров для пластинчатой структуры выберем для дальнейшего исследования начальное значение толщины пластин, равное 0,5 мм, расстояние между пластинами — 1,2 мм, а расстояние между электродами — 2,5 и 10 мм. Рабочее напряжение трудно унифицировать из-за изменения расстояния между электродами. Как показано на рис. 8a, 8b, при расстоянии между электродами, равном 2,5 мм, выбранное опорное напряжение составляет 6 кВ, а при расстоянии между электродами, равном 10 мм, — 9 кВ.

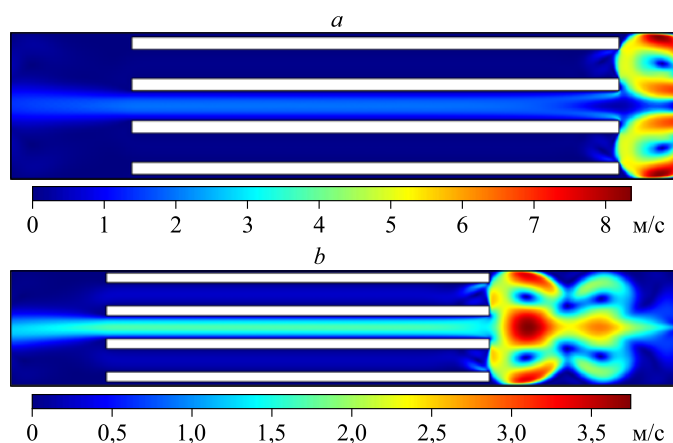


Рис. 8. Распределение скорости в пластинчато-игольчатой модели при расстояниях между электродами 2,5 (а), 10 (b) мм.

Как показано на рис. 8а, при расстоянии между электродами 2,5 мм излучающий электрод очень легко ионизирует воздух и индуцирует коронный разряд в узком зазоре. При рабочем напряжении 6 кВ плотность пространственного заряда резко возрастает. Вследствие увеличения центробежной силы в области дрейфа ионов генерируется высокоскоростной вихрь. При этом воздушный поток с более высокой скоростью и столбообразной формой не может сформироваться на входе в пластинчатый электрод из-за образования области низкого давления в середине двух вихрей и потеря скорости основного потока в канале между пластинами оказывается значительной. При увеличении расстояния между электродами до 10 мм поле течения меняется. Как показано на рис. 7b, в воздушном зазоре между инжектирующим и принимающим электродами возникают два варианта распределений скоростей. Вследствие увеличения воздушного зазора напряжение в конструкции с узким зазором не позволяет ионному пучку проходить через два электрода, поэтому необходимо увеличить начальное напряжение коронного разряда. При рабочем напряжении 9 кВ ионы в области короны ускоряются до зоны дрейфа ионов и длина зоны дрейфа при расстоянии между электродами, равном 10 мм, возрастает. Ускорение ионов происходит в двух четко выраженных областях: в первой локальный максимум скорости составляет около 2,5 м/с и располагается на расстоянии 5 мм от кончика иглы в горизонтальном направлении; во второй локальный максимум скорости равен примерно 3,5 м/с и располагается на расстоянии 6–10 мм от кончика иглы в горизонтальном направлении. Для конструкции с расстоянием между электродами 2,5 мм скорость намного меньше максимальной локальной скорости ветра в области короны.

#### 4.3. Влияние положения эмиттера

Любые две параллельные пластины пластинчатого электрода могут быть выбраны в качестве места расположения игольчатого электрода. Рассмотрим случаи трех различных мест расположения: на краю верхней пластины, в центре между двумя пластинами и на краю нижней пластины (обозначены как позиция 1, позиция 0 и позиция –1 соответственно). Как показано на рис. 9а, максимальная локальная скорость ветра на выходе в трех этих случаях почти одинакова и составляет около 2,15 м/с, но средние скорости

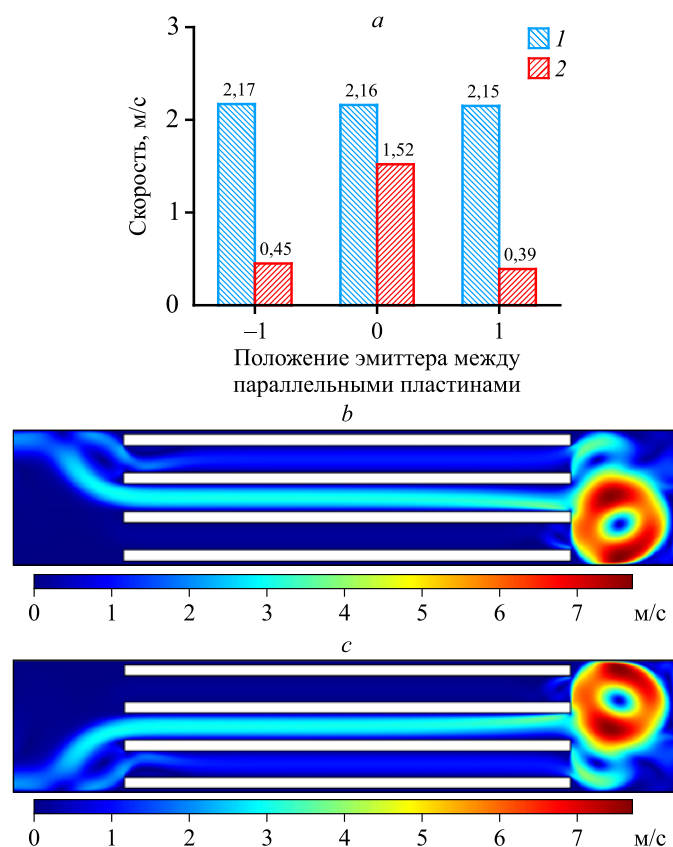


Рис. 9. Зависимость скорости на выходе от положения эмиттера между параллельными пластинами (a) и распределение скорости в пластинчато-игольчатой модели с положением эмиттера  $y = 1$  (b),  $-1$  (c).

ветра очень различаются. Средняя скорость ветра в позициях  $-1$  и  $1$  относительно низкая, для каждой из позиций она составляет  $0,45$  и  $0,39$  м/с соответственно. В позиции  $0$  средняя скорость ветра равна  $1,52$  м/с, что значительно выше значений в двух других позициях. Можно сделать вывод, что положение эмиттерного электрода влияет на направление воздушного потока и среднюю скорость ветра на выходе.

Как показано на рис. 9b, 9c, когда игольчатый электрод находится в положении  $1$ , воздушный поток, ионизированный кончиком иглы, в основном распространяется вверх по потоку в направлении  $y$ . Однако под действием электрического поля и центробежной силы в направлении вниз по потоку вдоль  $y$  возникают сильные возмущения течения и генерируются вихри. Нижняя пластина способствует образованию слоистой структуры воздушного потока на краю вихря. Высокоскоростной вихрь не может достигнуть выхода из канала вниз по потоку вдоль направления  $y$ . Поэтому скорость ветра на выходе из устройства в основном обеспечивается ионным ветром в двух других каналах. Таким образом, направление воздушного потока зависит от положения игольчатого электрода и оно обращено в сторону игольчатого электрода, поскольку ионный ветер вызывает интенсивное накопление воздушного потока на другой стороне области. Когда игольчатый электрод находится в положении  $0$  (в центре), поток воздуха в основном канале более концентрирован, потому что ионный ветер обращен в сторону игольчатого электрода

и не блокируется углами платы. Кроме того, как показано на рис. 4а–4с, скорость потока в верхнем и нижнем каналах одинакова, так как излучающий электрод находится в центре канала. Этот эффект отсутствует в положениях –1 и 1, и в результате средняя скорость ветра на выходе оказывается выше.

#### 4.4. Оптимальная конструкция устройства

Для проведения эксперимента по оптимизации устройства в работе использовался метод ортогонального планирования с учетом четырех влияющих факторов и тремя уровнями оптимизации. В качестве показателей оптимизации были выбраны средняя скорость ветра на выходе и максимальная локальная скорость ветра. Лучшие конструктивные параметры пластинчато-игольчатого ионного охладителя представлены в табл. 3.

Из табл. 4 можно видеть, что порядок влияния четырех факторов на среднюю скорость ветра на выходе следующий: расстояние между электродами, положение иглы, рабочее напряжение и затем отношение расстояния между пластинами к их толщине; а порядок четырех факторов по степени влияния на местную скорость ветра на выходе определен таким образом: расстояние между электродами, рабочее напряжение, отношение расстояния между пластинами и толщиной пластины, положение иглы. Наконец, выявлено следующее оптимальное сочетание параметров: положение иглы соответствует позиции 0, отношение расстояния между пластинами к толщине пластины равно 5, расстояние между электродами — 5 мм, рабочее напряжение — 7 кВ.

Таблица 3

Параметры для ортогонального планирования эксперимента

| Уровень | $d_{\text{fin}}/W_{\text{fin}}$ | Расстояние между электродами, мм | Положение иглы | Напряжение, кВ |
|---------|---------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------|
| 1       | 4                               | 5                                | –1             | 6              |
| 2       | 5                               | 7,5                              | 0              | 6,5            |
| 3       | 6                               | 10                               | 1              | 7              |

Таблица 4

Результаты ортогонального планирования экспериментов

| Эксперимент | $d_{\text{fin}}/W_{\text{fin}}$ | Расстояние между электродами, мм | Положение иглы | Напряжение, кВ | Средняя скорость, м/с | Локальная скорость, м/с |
|-------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------|-----------------------|-------------------------|
| 1           | 4                               | 5                                | –1             | 6              | 0,29                  | 1,07                    |
| 2           | 4                               | 7,5                              | 0              | 6,5            | 0,74                  | 1,64                    |
| 3           | 4                               | 10                               | 1              | 7              | 0,43                  | 1,21                    |
| 4           | 5                               | 5                                | 0              | 7              | 2,73                  | 4,11                    |
| 5           | 5                               | 7,5                              | 1              | 6              | 0,68                  | 1,7                     |
| 6           | 5                               | 10                               | –1             | 6,5            | 0,31                  | 1,09                    |
| 7           | 10                              | 5                                | 1              | 6,5            | 0,69                  | 2,04                    |
| 8           | 10                              | 7,5                              | –1             | 7              | 0,52                  | 1,97                    |
| 9           | 10                              | 10                               | 0              | 6              | 0,23                  | 0,57                    |
| k11         | 0,4867                          | 1,2367                           | 0,3733         | 0,4            | –                     | –                       |
| k12         | 1,24                            | 0,6467                           | 1,2333         | 0,58           | –                     | –                       |
| k13         | 0,48                            | 0,3233                           | 0,6            | 1,2267         | –                     | –                       |
| R1          | 0,76                            | 0,9133                           | 0,86           | 0,8267         | –                     | –                       |
| k21         | 1,3067                          | 2,4067                           | 1,3767         | 1,1133         | –                     | –                       |
| k22         | 2,3                             | 1,77                             | 2,1067         | 1,59           | –                     | –                       |
| k23         | 1,5267                          | 0,9567                           | 1,65           | 2,43           | –                     | –                       |
| R2          | 0,9933                          | 1,45                             | 0,73           | 1,3167         | –                     | –                       |

#### 4.5. Тестирование на производительность охладителя с оптимальной комбинацией параметров

Для полученной структуры с оптимальной комбинацией параметров, определенной выше, далее было проведено тестирование, результаты которого приведены на рис. 10. Здесь за значение потребляемой мощности конструкции отвода тепла принимается значение максимальной полной рассеиваемой мощности (ТДР) 30 Вт из работы [6]. Плотность объемного заряда на поверхности коронирующего электрода оптимизированного ионного охладителя достигает  $12 \cdot 10^{-3}$  Кл/м<sup>3</sup>. Максимальная локальная скорость ветра на выходе составляет 4,11 м/с, а средняя скорость ветра — 2,73 м/с, что соответственно на 90,3 и 79,6 % выше, чем до оптимизации. При рассеиваемой мощности микросхемы, равной 30 Вт, средняя температура поверхности пластины составляет 80,2, что ниже максимально допустимого диапазона рабочих температур микросхемы, составляющего от 85 до 100 °С. Примечательно, что не все тепло, выделяемое микросхемой, передается пластинчатому электроду и фактический тепловой поток пластины составляет менее 30 Вт. Результаты показывают, что одноступенчатый пластинчато-игольчатый ионный охладитель при сочетании оптимальных параметров имеет хорошие характеристики рассеивания тепла.

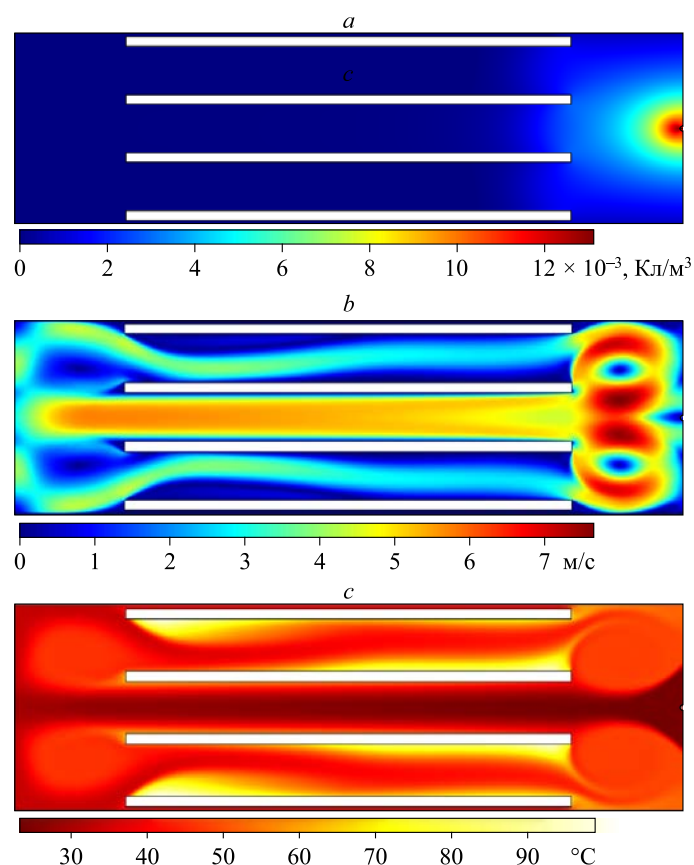


Рис. 10. Результаты тестирования на производительность ионно-охлаждающей системы с оптимизированной комбинацией параметров: плотность объемного заряда (a), поле течения (b), температурное поле (c).

## 5. Производительность двухступенчатых ионных охладителей

### 5.1. Двухступенчатая структурная модель

С целью увеличения скорости ионного ветра был разработан ионный охладитель с двухступенчатой структурой. Для этого использовано последовательное соединение сетчато-игольчатой и пластинчато-игольчатой конструкций. На рис. 11а первая ступень в экспериментальном прототипе представляет собой сетчато-игольчатый охладитель, а вторая — пластинчато-игольчатый. Расстояние между электродами, так же как и расстояние между ступенями, равно 5 мм. Результаты эксперимента показывают, что при рабочем напряжении 7 кВ максимальная местная скорость ветра на выходе составляет 2,45 м/с, что всего на 10,8 % превышает экспериментальную скорость ветра в одноступенчатой конструкции.

Ввиду того, что влияние скорости ветра, создаваемое экспериментальным прототипом с двухступенчатой структурой, не продемонстрировало ожидаемого эффекта, авторы выполнили двумерное моделирование и оптимизацию моделируемого ионного охладителя с двухступенчатой структурой (см. рис. 11b). Из рис. 11с видно, что результаты этого моделирования в основном согласуются с экспериментальными данными, а максимальная относительная ошибка составляет 6,8 %, что соответствует разумному диапазону. Модель можно признать надежной.

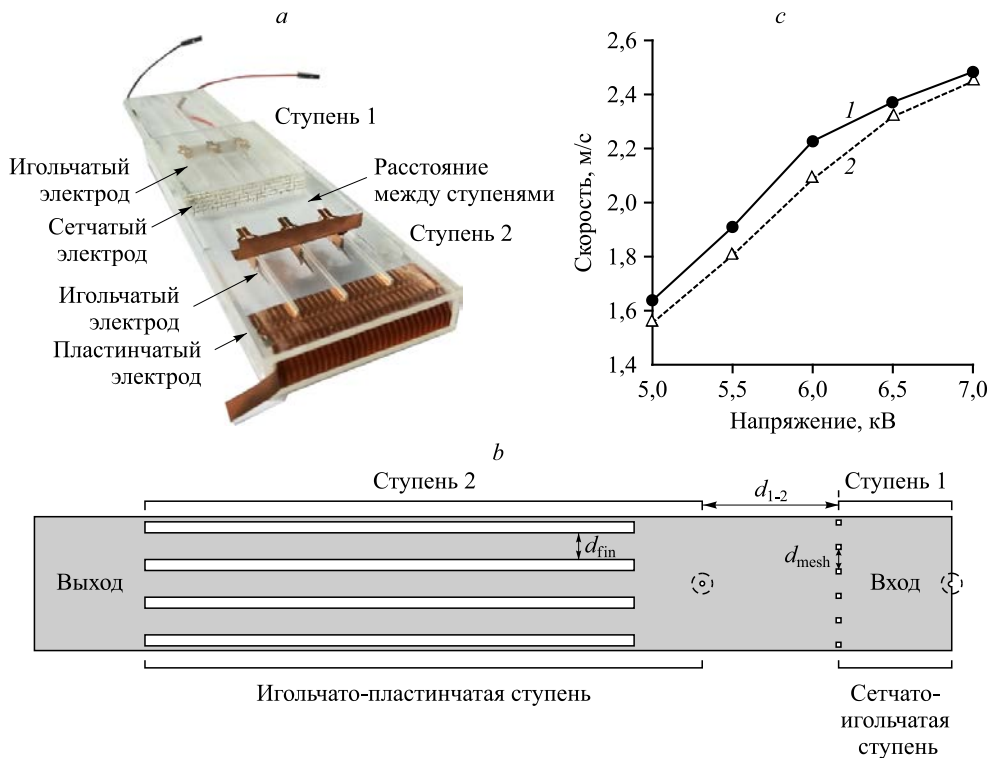


Рис. 11. Экспериментальный прототип двухступенчатой ионно-охладительной системы (а), двумерная модель двухступенчатой ионно-охладительной системы (b) и верификация максимальной локальной скорости на выходе (с).

с: 1 — результаты моделирования, 2 — экспериментальные данные;  $d_{1-2}$  — расстояние между ступенями, мм.

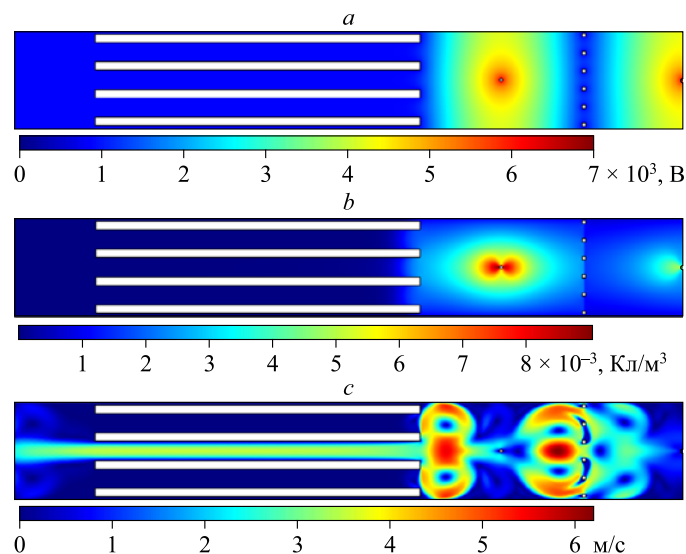


Рис. 12. Результаты численного тестирования двухступенчатой ионно-охлаждающей системы: напряжение (а), плотность объемного заряда (b), поле течения (с).

## 5.2. Моделирование двухступенчатой конструкции

Из рис. 12а, 12b видно, что в области между ступенями игольчатый электрод второй ступени создает также обратный коронный разряд на сетчатый электрод первой ступени. В области между ступенями имеет место инверсное распределение электрического потенциала и плотности пространственного заряда. Соответственно, в области между ступенями охладителя формируется ионный ветер, противоположный направлению воздушного потока. На рис. 12с показано распределение поля потока двухступенчатой конструкции. Очевидно, что, когда ионный ветер от сетчато-игольчатого охладителя первой ступени попадает в зону между ступенями, на него воздействует сила инверсного электрического поля и формируется возвратный поток воздуха. Это приводит к сильным нарушениям движения воздушного потока, к явлению накопления и к значительной потере кинетической энергии воздуха в области между ступенями. Поэтому первая ступень оказывает лишь незначительное стимулирующее влияние на пластинчато-игольчатый охладитель второй ступени.

## 5.3. Оптимизированная двухступенчатая конструкция ионного охладителя

Из предыдущего анализа следует, что причиной, по которой производительность ионного охладителя с двухступенчатой структурой увеличивается весьма незначительно, служит явление обратного коронного разряда в области между ступенями. Для уменьшения его влияния на поле потока в этой области следует оптимизировать расстояние между ступенями. На рис. 13 показано влияние расстояния между ступенями на скорость ветра на выходе двухступенчатой конструкции. Поведение локальной и средней скоростей ветра при изменении расстояния между ступенями подобно, а максимальная скорость ветра наблюдается в конструкции с расстоянием между ступенями 20 мм. В этом случае максимальная локальная скорость ветра на выходе достигает значения 4,96 м/с,

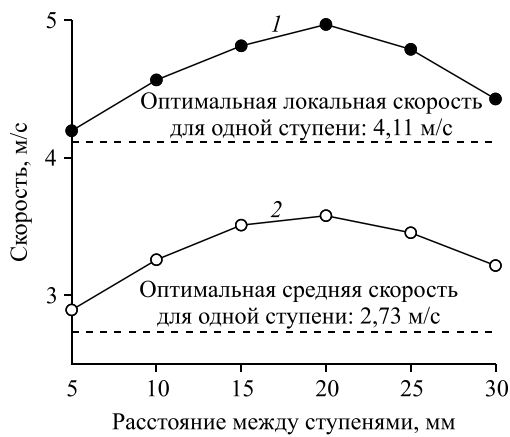


Рис. 13. Зависимость локальной (1) и средней (2) скоростей на выходе от расстояния между ступенями.

а средняя скорость — 3,57 м/с, что соответственно на 20,7 и 30,8 % выше, чем у пластинчато-игольчатого ионного охладителя с оптимальной одноступенчатой конструкцией. В рассмотренном варианте значительно увеличивается скорость ветра, создаваемая двухступенчатой конструкцией, и особенно средняя скорость ветра на выходе. Таким образом, учитывая характеристики скорости ветра

и требования к объему охладителя, расстояние в 20 мм следует выбрать как оптимальное между ступенями двухступенчатой конструкции.

#### 5.4. Тестирование на производительность двухступенчатой конструкции с оптимальной комбинацией значений параметров

В результате проведенной работы по оптимизации получено оптимальное сочетание параметров двухступенчатой системы, что позволяет теперь изучить характеристики гидродинамического поля новой конструкции. Как показано на рис. 14а, максимальные плотности объемного заряда первой и второй ступеней почти не изменились по сравнению с теми, которые имели место до оптимизации. Однако из-за увеличения расстояния между ступенями явление обратного разряда эмиссионного электрода второй ступени на приемный электрод первой ступени исчезло, а также исчез и обратный заряд. Это доказывает, что воздушный поток ионного ветра не подвержен влиянию обратного электрического поля. На рис. 14b показано поле течения в новой конструкции. По сравнению с тем, что было до оптимизации, в этом случае отсутствует накопление обратного воздушного потока, оно заменяется нерегулярным движением воздушного потока в одном направлении, поскольку увеличение расстояния между ступенями приводит к постепенно расходящемуся течению в ускорителе. Когда воздушный поток ионного ветра первого ускорителя достигает пластинчато-игольчатого ускорителя второй ступени, скорость

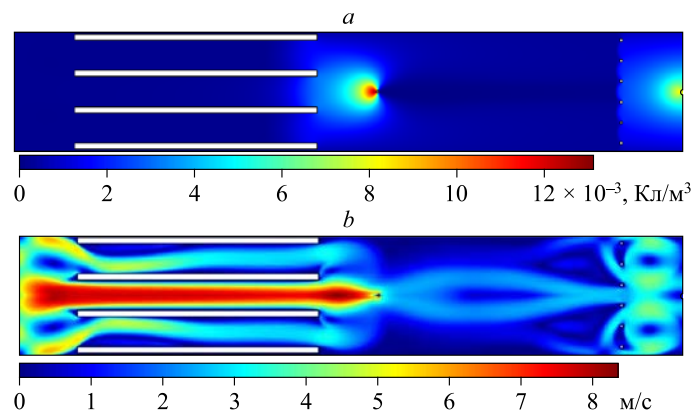
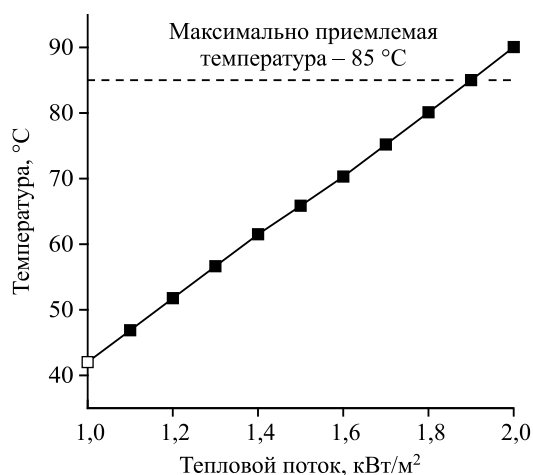


Рис. 14. Эксплуатационные испытания оптимизированной двухступенчатой ионно-охладительной системы: плотность объемного заряда (а), поле течения (b).

Рис. 15. Зависимость средней температуры пластины от теплового потока.

ионного ветра оказывается большей, чем в случае одноступенчатой конструкции. Локальный максимум скорости в области короны и в области основного потока в канале между пластинами возрастает более чем на 1 м/с по сравнению с одноступенчатой конструкцией. Это подтверждает, что двухступенчатая конструкция имеет преимущества в отношении скорости ветра на выходе.

Рисунок 15 демонстрирует использование новой оптимизированной ступенчатой конструкции в различных условиях теплового потока. Видно, что средняя температура поверхности пластины растет с увеличением теплового потока. По сравнению с одноступенчатой конструкцией средняя скорость ветра на выходе из двухступенчатой конструкции значительно возрастает. При одинаковом значении теплового потока, равном  $1500 \text{ Вт/м}^2$ , средняя температура поверхности новой двухступенчатой конструкции составляет  $65,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , что на 17,9 % ниже, чем у одноступенчатой конструкции. Это свидетельствует о хороших характеристиках рассеивания тепла. Из рис. 15 видно, что в случае, когда тепловой поток пластины превышает  $1900 \text{ Вт/м}^2$  (соответствующая рассеиваемая мощность микросхемы составляет 38 Вт), средняя температура поверхности пластины оказывается выше максимально допустимой температуры, составляющей  $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .



### Выводы

Разработана двумерная численная модель ионных охладителей на основе пластинчато-игольчатых и сетчато-игольчатых экспериментальных ионных устройств с целью изучения их характеристик, включая распределение электрического поля, поля течения и температурного поля. С помощью численной модели исследованы и оптимизированы параметры пластинчато-игольчатого ионного охладителя. Методом ортогонального планирования эксперимента установлено оптимальное сочетание конструктивных параметров. Кроме того, предложена двухступенчатая конструкция пластинчато-игольчатого ионного охладителя, а также создана численная модель для ее анализа и оптимизации. Показано, что двухступенчатая структура охладителя может увеличить скорость ветра на выходе, что обеспечивает теоретическую основу для применения пластинчато-игольчатого ионного охладителя при различных условиях теплового потока. Основные выводы работы можно сформулировать следующим образом.

1. В электрическом поле как распределение потенциала, так и распределение плотности объемного заряда постепенно уменьшаются до нуля от излучающего электрода до входа приемного электрода. Отличие состоит в том, что распределение плотности пространственного заряда имеет явно эллиптическую форму и плотность заряда в горизонтальном направлении на кончике игольчатого электрода заведомо превышает таковую в окрестности стенки канала.

2. В поле течения пластинчато-игольчатой структуры образуется высокоскоростной ионный вихрь на входе пластинчатого электрода у стенки, в результате чего скорость

потока в центральном канале пластины начинает значительно превышать таковую в других каналах. Распределение скорости ветра на выходе сетчато-игольчатой модели является более сложным. Ионная струя легче проходит через сетчатый приемный электрод и не вызывает накопления воздушного потока на входной стороне сетчатого электрода, а средняя скорость ветра на выходе является более высокой.

3. Что касается поля температуры, то коэффициент конвективной теплопередачи области основного течения оказывается более высоким, а температура поверхности пластины — более низкой; скорость потока верхнего и нижнего каналов понижается, а температура поверхности повышается.

4. Степень влияния четырех факторов на среднюю скорость ветра на выходе от большей к меньшей такова: расстояние между электродами, положение иглы, рабочее напряжение и, наконец, отношение расстояния между пластинами к их толщине; а степень влияния на скорость местного ветра на выходе будет иметь следующую последовательность: расстояние между электродами, рабочее напряжение, отношение расстояния между пластинами к их толщине, положение иглы. Наилучшее сочетание параметров следующее: отношение расстояния между пластинами к их толщине должно быть равно 5, расстояние между электродами также должно составлять 5 мм, положение иглы должно быть «нулевым», а рабочее напряжение равно 7 кВ.

5. Максимальная локальная скорость ветра на выходе из оптимизированного ионного охладителя составляет 4,11 м/с, а средняя скорость ветра — 2,73 м/с, что соответственно на 90,3 и 79,6 % превышает таковые до оптимизации. При рассеиваемой мощности, равной 30 Вт, средняя температура поверхности пластин составляет 80,2 °С. Это значение ниже максимального допустимого диапазона температур, составляющего 85 ~ 100 °С.

6. В двухступенчатой конструкции оптимальное расстояние между ступенями составляет 20 мм, максимальная локальная скорость ветра достигает 4,96 м/с, средняя скорость ветра — 3,57 м/с, что соответственно на 20,7 и 30,8 % выше, чем у одноступенчатой конструкции. При рассеиваемой мощности, равной 30 Вт, средняя температура поверхности оптимизированных ребер составляет 65,8 °С, что на 17,9 % ниже, чем у одноступенчатой конструкции.

#### Обозначения

|                                                                                                |                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| $A$ — площадь излучающей поверхности, м <sup>2</sup> ,                                         | $\mu_E$ — подвижность ионов, м <sup>2</sup> /(В·с),                |
| $A_{out}$ — площадь выходного сечения охладителя, м <sup>2</sup> ,                             | $\sigma^2$ — дисперсия распределения скорости ветра,               |
| $d$ — расстояние между излучающим и приемным электродами, мм,                                  | $\rho_q$ — плотность объемного заряда, К/м <sup>3</sup> ,          |
| $d_{fin}$ — расстояние между пластинами, мм,                                                   | $r$ — радиус кривизны излучающего электрода, мм,                   |
| $d_{outlet}$ — выходной воздушный зазор, мм,                                                   | $\varepsilon_0$ — диэлектрическая проницаемость вакуума,           |
| $E$ — напряженность электрического поля, В/м,                                                  | $\mu$ — аэродинамическая вязкость, Н·(с/м <sup>2</sup> ),          |
| $e$ — элементарный заряд, К,                                                                   | $T_i$ — температура ионов, °С,                                     |
| $Re$ — число Рейнольдса,                                                                       | $E_0$ — напряженность поля пробоя, В/м,                            |
| $F_{END}$ — электрогидродинамическая сила, Н,                                                  | $p$ — давление, Па,                                                |
| $\lambda$ — теплопроводность жидкости, Вт/(м·К),                                               | $T$ — температура источника тепла во время эксперимента, °С или К, |
| $h$ — коэффициент конвективного теплопереноса, Вт/(м <sup>2</sup> ·К),                         | $T_0$ — опорная температура окружающей среды, °С или К,            |
| $\Delta T$ — разность температур между охлаждаемой поверхностью и окружающей средой, °С или К, | $Nu$ — число Нуссельта,                                            |
| $W_{fin}$ — толщина пластинчатого электрода в двумерной модели, м,                             | $\Delta T_{drop}$ — падение температуры, °С,                       |
| $z_q$ — кратность заряда ионов,                                                                | $u$ — скорость ионного ветра, м/с,                                 |
|                                                                                                | $V$ — рабочее напряжение, кВ.                                      |
|                                                                                                | $J$ — плотность тока, А/м <sup>2</sup> .                           |

Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

## Список литературы

1. Abdelmlek K.B., Araoud Z., Charrada K., Zissis G. Optimization of the thermal distribution of multi-chip LED package // *Appl. Therm. Engng.* 2017. Vol. 126. P. 653–660.
2. Wu G., Zeng F., Zhu G. Research on ventilation cooling system of communication base stations for energy saving and emission reduction // *EnergBuildings.* 2017. Vol. 147. P. 67–76.
3. Taghavi Fadaki S.S., Amanifard N., Deylami H.M., Dolati F. Numerical analysis of the EHD driven flow with heat transfer in a smooth channel using multiple collectors // *Heat Mass Transfer.* 2017. Vol. 53, No. 7. P. 2445–2460.
4. Tsui Y.Y., Huang Y.X., Lan C.C., Wang C.C. A study of heat transfer enhancement via corona discharge by using a plate corona electrode // *J. Electrostat.* 2017. Vol. 87. P. 1–10.
5. Gallandat N., Bonetto F., Mayor J.R. Ionic wind heat transfer enhancement in vertical rectangular channels: experimental study and model validation // *J. Therm. Sci. Engng Appl.* 2017. Vol. 9, No. 2. P. 021005–1–021005–9.
6. Ramadhan A.A., Kapur N., Summers J.L., Thompson H.M. Numerical development of EHD cooling systems for laptop applications // *Appl. Therm. Engng.* 2018. Vol. 139. P. 144–156.
7. June M.S., Kribs J., Lyons K.M. Measuring efficiency of positive and negative ionic wind devices for comparison to fans and blowers // *J. Electrostat.* 2011. Vol. 69, No. 4, P. 345–350.
8. Go D.B., Maturana R.A., Fisher T.S., Garimella S.V. Enhancement of external forced convection by ionic wind // *Inter. J. Heat Mass Tran.* 2008. Vol. 51, No. 25–26. P. 6047–6053.
9. Елагин И.А., Марковский П.Ю., Стишков Ю.К. Экспериментальное исследование охлаждения пластины электрическим ветром от игольчатого электрода // *ЖТФ.* 2020. Т. 90, вып. 4, 568–573.
10. Feng J., Wang C., Liu Q., Wu C. Enhancement of heat transfer via corona discharge by using needle-mesh and needle-fin electrodes // *Inter. J. Heat Mass Tran.* 2019. Vol. 130. P. 640–649.
11. Wang J., Cai Y.X., Bao W.W., Li H.X., Liu Q. Experimental study of high power LEDs heat dissipation based on corona discharge // *Appl. Therm. Engng.* 2016. Vol. 98. P. 420–429.
12. Sumariyah S., Khuriati A., Pratiwi S.H., Fachriyah E. Ion wind drying with input power variation of the potato slices // *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1524, Iss. 1. Art. 012001.
13. Van N.T., Bui T.T., Dinh T.X., Tran C.D., Phan-Thanh H., Duc T.C., Dau V.T. A circulatory ionic wind for inertial sensing application // *IEEE Electr. Device L.* 2019. Vol. 40, No. 7. P. 1182–1185.
14. Wang Y., Gao W., Zhang H., Huang C., Luo K., Zheng C., Gao X. Insights into the role of ionic wind in honeycomb electrostatic precipitators // *J. Aerosol. Sci.* 2019. Vol. 133. P. 83–95.
15. Leu J.S., Jang J.Y., Wu Y.H. Optimization of the wire electrode height and pitch for 3-D electrohydrodynamic enhanced water evaporation // *Inter. J. Heat Mass Trans.* 2018. Vol. 118. P. 976–988.
16. Lv F., Song J., Wang P., Ruan H., Geng J. Influencing factors of flow field of ionic wind induced by corona discharge in a multi-needle-to-net electrode structure under direct-current voltage // *IEEE Access.* 2019. Vol. 7. P. 123671–123678.
17. Zhang J., Kong L., Qu J., Wang S., Qu Z. Numerical and experimental investigation on configuration optimization of the large-size ionic wind pump // *Energy.* 2019. Vol. 171. P. 624–630.
18. Kim C., Park D., Noh K.C., Hwang J. Velocity and energy conversion efficiency characteristics of ionic wind generator in a multistage configuration // *J. Electrostat.* 2010. Vol. 68, No. 1. P. 36–41.
19. Wang J., Hu X., Mo X., Sun Z., Fu R. Flow and heat transfer characteristics of corona wind in two symmetric divergent fins // *Inter. J. Heat Mass Trans.* 2020. Vol. 160. Art. 120210.
20. Zhang J.F., Wang S., Li H.Y., Qu Z.G. Parametric study and optimization of flow characteristics of wire-nonparallel plate-type electrostatic air accelerators // *J. Fluids Engng.* 2018. Vol. 140, No. 10. P. 1011051–10110511.
21. Rickard M., Dunn-Rankin D., Weinberg F., Carleton F. Maximizing ion-driven gas flows // *J. Electrostat.* 2006. Vol. 64, No. 6. P. 368–376.
22. Wang W., Yang L., Wu K., Lin C., Huo P., Liu S., Huang D., Lin M. Regulation-controlling of boundary layer by multi-wire-to-cylinder negative corona discharge // *Appl. Therm. Engng.* 2017. Vol. 119. P. 438–448.
23. Adamiak K., Atten P. Simulation of corona discharge in point-plane configuration // *J. Electrostat.* 2004. Vol. 61, No. 2. P. 85–98.
24. Deylami H.M., Amanifard N., Dolati F., Kouhikamali R., Mostajiri K. Numerical investigation of using various electrode arrangements for amplifying the EHD enhanced heat transfer in a smooth channel // *J. Electrostat.* 2013. Vol. 71, No. 4. P. 656–665.
25. Lakeh R.B., Molki M. Targeted heat transfer augmentation in circular tubes using a corona jet // *J. Electrostat.* 2012. Vol. 70, No. 1. P. 31–42.
26. Luo K., Wu J., Yi H.-L., Tan H.-P. Lattice Boltzmann modelling of electro-thermo-convection in a planar layer of dielectric liquid subjected to unipolar injection and thermal gradient // *Inter. J. Heat Mass Trans.* 2016. Vol. 103. P. 832–846.

27. **Ong A.O., Abramson A.R., Tien N.C.** Electrohydrodynamic microfabricated ionic wind pumps for thermal management applications // J. Heat Trans. 2014. Vol. 136, No. 6. P. 061703-1–061703-11.
28. **Wang S., Zhang J., Kong L., Qu Z., Tao W.** An numerical investigation on the cooling capacity of needle-ring type electrostatic fluid accelerators for round plate with uniform and non-uniform heat flux // Inter. J. Heat Mass. Trans. 2017. Vol. 113. P. 1–5.

*Статья поступила в редакцию 28 июня 2021 г.,  
после доработки — 1 октября 2021 г.,  
принята к публикации 20 октября 2022 г.,  
после дополнительной доработки — 1 февраля 2022 г.*