

## Экспериментальное исследование охлаждения пластины электрическим ветром от коронирующего проволочного электрода

© И.А. Елагин, В.В. Яковлев, И.А. Ашихмин, Ю.К. Стишков

Санкт-Петербургский государственный университет,  
199034 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: i.elagin@spbu.ru

(Поступило в Редакцию 30 октября 2015 г.)

Приведены результаты экспериментальных исследований кинематической структуры электрического ветра от проволочного электрода, расположенного у нагретой пластины, которая играет роль заземленного электрода. Исследования проведены в широком диапазоне напряжений для разных полярностей провода при нескольких значениях межэлектродного расстояния. Проведено сравнение структуры течений, возникающих при естественной конвекции в открытом воздушном пространстве, для разных положений пластины и при наличии быстрой струи электрического ветра, которая значительно интенсифицирует теплообмен в пограничном слое у нагретого плоского электрода. Получены локальные распределения температуры по поверхности пластины, а также интегральные зависимости эффективности отвода тепла от электрических параметров коронного разряда. Скорость воздушных течений при электрическом ветре достигала 4 м/с, а отводимая от пластины тепловая мощность при фиксированном перегреве увеличивалась до 9 раз по сравнению с естественной конвекцией.

### Введение

В чехле коронного разряда в воздухе образуются ионы, которые при перемещении во внешней зоне разряда передают свой импульс нейтральным молекулам, вызывая появление довольно интенсивных воздушных потоков [1], которые называются электрическим (или ионным) ветром. Направляя эти потоки на нагретые поверхности, можно существенно интенсифицировать отвод тепла с этих поверхностей. Этому вопросу посвящено большое количество работ [2–5], в частности, в работах [3,4] показано, что при помощи электрического ветра от игольчатых электродов можно существенно повлиять на пристеночный тепловой слой от вертикальной нагреваемой пластины.

Сама по себе проблема перегрева отдельных деталей стоит достаточно остро в большом количестве различных технических устройств. Она решается различными способами. В некоторых случаях достаточно естественных конвективных потоков в поле тяжести Земли. При этом тепловые слои, возникающие у нагретых поверхностей, обычно имеют достаточно большую толщину, что определяется свойствами рабочей среды, например воздуха, и малыми скоростями конвективных течений в динамическом пограничном слое, которые не превышают нескольких десятков см/с. Отметим также, что в условиях невесомости естественной конвекции не возникает вообще. Поэтому приходится прибегать к вынужденному охлаждению с помощью достаточно сложных устройств (вентиляторы, тепловые трубки, испарители и т.п.). Использование электрического ветра имеет ряд преимуществ, таких как бесшумность, отсутствие трущихся частей, простота конструкции и т.п. Особенностью электрического ветра являются небольшие поперечные размеры образующихся потоков и высокая скорость течений. В последнее время в связи с

развитием микроэлектроники и увеличением мощности ее компонент с соответствующим увеличением тепловыделения делается много попыток применять электрический ветер для охлаждения миниатюрных объектов, так как обычные варианты охлаждения в большинстве своем на микромасштабах недостаточно эффективны. Уменьшение размеров коронирующего электрода (до нескольких  $\mu\text{m}$ ) и межэлектродных расстояний (до нескольких  $\mu\text{m}$ ) позволяют создавать микромасштабные воздушные течения [5]. Существуют прототипы так называемых электрогидродинамических (ЭГД) ускорителей, которые можно встраивать вместо вентилятора в ноутбук с меньшими габаритами и большей эффективностью [6].

В настоящей работе исследован электрический ветер средних масштабов, возникающий в системе электродов провод–плоскость. При этом плоская пластина, являющаяся также заземленным электродом, нагревалась до достаточно высокой температуры (порядка 360 К), которая близка к критической для многих конструктивных элементов различных технических устройств. В отличие от многих работ, например [7], в которых исследуется локальная интенсификация охлаждения тонкой струей электрического ветра, здесь будет рассматриваться достаточно протяженная и массивная пластина и будет показано, что эта струя, направленная от высоковольтного проволочного электрода к нагретой поверхности, позволяет эффективно охлаждать весь достаточно протяженный объект целиком, значительно снижая его температуру. Эффективность охлаждения существенно зависит от электрических параметров системы, основным при этом является вкладываемая электрическая мощность, которая расходуется на поддержание коронного разряда. В работе рассмотрен широкий диапазон напряжений при различных полярностях проволочного электрода, а так-

же проведено варьирование величины межэлектродного расстояния.

Также необходимо отметить, что само по себе явление электрического ветра на данный момент изучено недостаточно подробно из-за его сложности и взаимосвязи различных физических процессов. Существует достаточно много работ, в которых экспериментально изучаются характеристики электрического ветра в различных системах электродов, например [8,9]. Однако зачастую им не хватает общности. Если рассматривается охлаждение объектов, то обычно акцент смещается на распределение температуры, данные о пространственных характеристиках течения зачастую отсутствуют. Работ по исследованию структуры поля скоростей течений достаточно мало, что связано с их сложностью, отметим, например, [10]. В последнее время с развитием новых методов стала возможна подробная визуализация течений, которая позволяет судить об особенностях конвективного переноса вещества, в том числе за счет электрического ветра. Однако стоит отметить тенденцию применения этих методов в данной области к системам многих электродов, когда возникающие струйные течения имеют достаточно сложный вид (что характерно, например, для электрофильтров [11]). Эти исследования позволяют судить о характеристиках устройства в целом, однако они зачастую не позволяют подробно разобраться в сути происходящих процессов и более глубоко понять все физические аспекты такого комплексного явления, как электрический ветер. При исследовании процесса охлаждения, особенно в микромасштабах, обычно структуру течений не исследуют вовсе [7], хотя именно она определяет интенсификацию отвода тепла. Некоторые данные о структуре течения может дать компьютерное моделирование, однако соответствующие расчеты сложны, в основном применяются различные упрощенные модели [12–14].

В настоящей работе для визуализации течений в отсутствие и при наличии электрического ветра используется PIV-метод, который позволяет получать подробное распределение скоростей в различных сечениях. Проведено сравнение структуры гидродинамических слоев, которая является определяющим фактором при описании конвективного теплообмена у поверхности нагретого объекта. Полученные данные позволяют наглядно объяснить причины увеличения теплоотвода с нагретой поверхности с помощью струи электрического ветра. Приведены локальные распределения температуры по поверхности пластины, а также интегральные зависимости отводимой тепловой мощности при постоянном перегреве от затрачиваемой электрической мощности.

## 1. Постановка эксперимента

В настоящей работе исследуются возможности охлаждения алюминиевой пластины (размеры  $190 \times 110 \times 6$  mm, рис. 1) с помощью естественной конвекции и электрического ветра в открытом

воздушном пространстве. Рассматривается интенсивное охлаждение только с одной „лицевой“ стороны пластины, для этого она обратной стороной помещается в „кожух“ из теплоизолирующего поролона толщиной 100 mm (рис. 1). Для получения стабильных течений при изучении электрического ветра удобно расположить нагреваемую пластину, играющую роль коллекторного электрода, горизонтально лицевой стороной вверх. Высоковольтный коронирующий провод при этом располагался параллельно пластине над ней по центру вдоль короткой стороны, как показано на рис. 1. В этом случае можно получить струю воздуха, направленную перпендикулярно к пластине, и изучить протяженные тепловые и динамические слои у поверхности пластины.

Для нагрева пластины использовался нихромовый провод, равномерно намотанный на текстолитовую подложку, плотно прижатый к алюминиевой пластине с обратной стороны и подключенный к источнику напряжения. Эта система обеспечивала перегрев пластины в естественных условиях примерно на 150 K относительно температуры окружающей среды. Для обеспечения равномерного отвода тепла за счет излучения, повторяемости результатов, а также для улучшения качества получаемых с помощью тепловизора (Fluke Ti32) данных о распределении температуры лицевая поверхность пластины была покрыта графитовой смазкой graphit 33, обеспечивающей сухое электропроводящее покрытие, и слоем аэрозоля, который использовался для визуализации течений с помощью PIV-установки. Коэффициент серости поверхности при этом равен 0.9. Для контроля температуры пластины в процессе установления тепловых процессов, а также для градуировки тепловизора использовались терморезисторы, встроенные в пластину с обратной стороны. На коронирующий провод (рис. 1) диаметром  $100 \mu\text{m}$  подавался высокий потенциал (положительной либо отрицательной полярности) с помощью высоковольтного источника постоянного напряжения ВИДН-30. Напряжения и токи в системе измерялись с помощью АЦП L-Card L-761.

В областях интереса с помощью PIV-установки (FlowMaster от компании LaVision) снимались картины распределения скоростей. Для визуализации течений

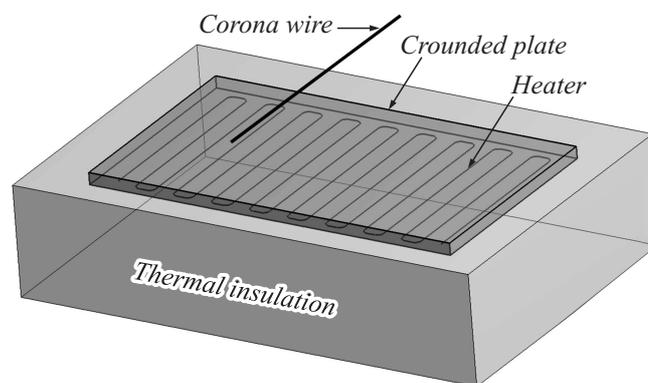


Рис. 1. Упрощенная схема основных элементов экспериментального макета.

использовался аэрозоль  $C_{26}H_{50}O_4$ , частички которого имеют малые размеры и практически не влияют на основные физические характеристики рассматриваемого явления [10]. Специальная обработка последовательности кадров позволяет получить распределение скоростей в плоскости съемки. Учитывая протяженность пластины, а также необходимость исследования достаточно больших межэлектродных расстояний, для детального исследования структуры воздушных течений в некоторых случаях производились съемки нескольких участков в одной и той же плоскости сечения, а потом эти данные объединялись для получения высокого пространственного разрешения.

При проведении исследований пластина нагревалась до установившегося состояния. Температура в большинстве экспериментов по поверхности пластины распределена достаточно однородно из-за ее толщины и высокой теплопроводности. Характерное среднее значение перегрева  $\Delta T = 65$  К для пластины фиксировалось для каждого эксперимента с помощью подбора необходимой мощности нагревательного элемента. При этом легче оценивать эффективность интенсификации охлаждения пластины за счет электрического ветра, так как от температуры параметры системы могут зависеть нелинейно, в частности коэффициент естественной конвекции. Также в этом случае остаются постоянными потери тепла, связанные с его возможным уходом за счет излучения, через поролон и другие элементы конструкции.

Для оценки относительной эффективности электрического ветра сначала проводилось несколько экспериментов по охлаждению пластины с помощью естественной конвекции. Теплоотвод (его конвективная составляющая) в этом случае зависит от ее расположения в пространстве, так как подъемная сила направлена вертикально против действия силы тяжести.

При проведении экспериментов с электрическим ветром расстояние между нитью и плоскостью варьировалось в диапазоне 15–65 мм. Напряжение изменялось в диапазоне от 5 до 35 кВ.

## 2. Охлаждение пластины за счет естественной конвекции

Сначала были проведены оценки эффективности охлаждения рассматриваемой пластины за счет естественной конвекции. При вертикальном расположении у нагретой плоскости формируются стабильные пристеночные тепловые и гидродинамические пограничные слои. С помощью PIV-установки было визуализировано распределение скоростей, которое представлено вместе с линиями тока на рис. 2, при среднем перегреве пластины  $\Delta T = 65$  К относительно температуры окружающей среды  $T_0 = 295$  К. Для удобства сравнения со структурой электрического ветра график развернут на  $90^\circ$  относительно исходного положения, о чем свидетельствует направление силы тяжести на рис. 2. Распределение температуры на поверхности пластины исследовалось

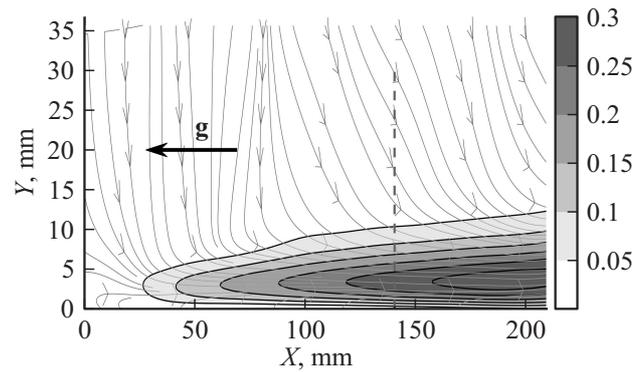
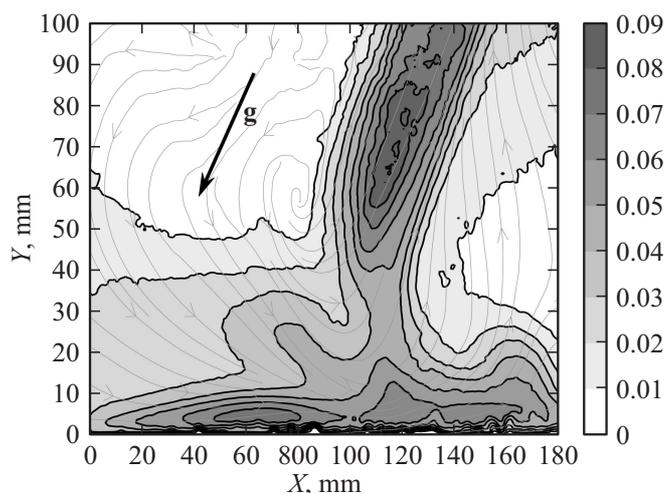


Рис. 2. Распределение скорости (m/s) в динамическом пограничном слое и линии тока при естественной конвекции у вертикально расположенной пластины. Поверхность пластины соответствует  $Y = 0$ .

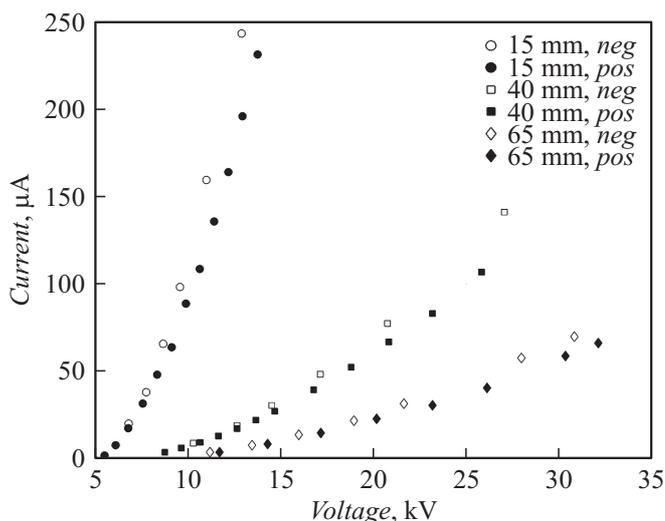
с помощью тепловизора, оно в данном случае практически однородно, так как пластина достаточно толстая и имеет высокий коэффициент теплопроводности. Здесь и далее графики распределений скорости немного сжаты вдоль пластины, так как ее длина в некоторых случаях значительно превосходит поперечные размеры области интереса, которая характеризуется толщиной динамического слоя и межэлектродным расстоянием в случае электрического ветра, о чем свидетельствуют значения координат (ось  $X$  на всех рисунках направлена параллельно пластине, ось  $Y$  — перпендикулярно), также указанные на рисунках. Толщина динамического пограничного слоя постепенно увеличивается по высоте пластины по мере нагревания слоя и диффузии тепла в открытое пространство и в верхней ее части составляет примерно 10 мм. Максимум скорости достигает значения 0.3 м/с и располагается примерно на расстоянии 3 мм от поверхности. Штрихами на рис. 2 отмечена линия, вдоль которой построен профиль скорости в пограничном слое на рис. 7 (см. ниже). Полученная картина соответствует классической структуре динамического пограничного слоя у вертикальной пластины [15].

По результатам эксперимента после исключения постоянной составляющей теплового потока (при фиксированном нагреве пластины), уходящей за счет излучения и через поролон, была найдена конвективная составляющая тепловой мощности  $W_{ncv} = 8$  Вт, рассеиваемой с лицевой стороны пластины, которая определяется динамическим слоем, приведенным на рис. 2. Изменение структуры этого пограничного слоя с помощью электрического ветра позволяет управлять конвективным тепловым потоком с поверхности пластины.

При горизонтальном расположении пластины лицевой стороной вверх при  $\Delta T = 65$  К за счет естественной конвекции было отведено  $W_{nch} = 5$  Вт, что на 3 Вт меньше, чем при вертикальном расположении. Это связано только с изменением структуры пристеночного пограничного слоя. При этом естественная конвекция нестабильна, вдоль пластины образуется большое количество



**Рис. 3.** Мгновенное распределение скорости (m/s) при естественной конвекции у пластины, наклоненной на  $14^\circ$  относительно горизонтального расположения. Поверхность пластины соответствует  $Y = 0$ .



**Рис. 4.** Вольт-амперные характеристики для различных межэлектродных расстояний при положительной и отрицательной полярностях проволочного электрода.

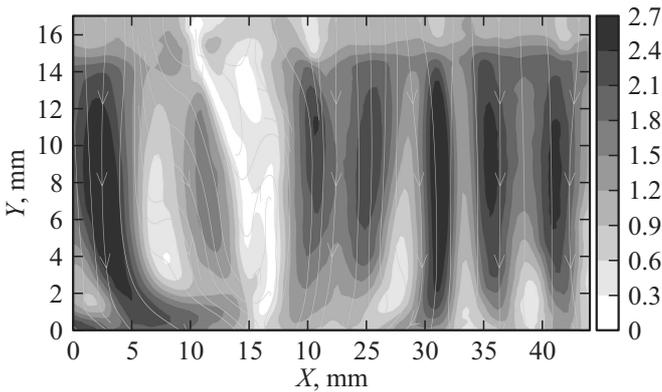
ячеистых вихрей, периодически от нее отрывающихся. Для того, чтобы стабилизировать течение, пластина (вместе с окружающим ее пороном) была немного наклонена относительно горизонтальной плоскости, также был уменьшен перегрев до 26 К. Угол наклона, при котором формируется достаточно устойчивый восходящий факел, составил примерно  $14^\circ$ . Факел немного колеблется относительно вертикальной оси, поэтому на рис. 3 приведена характерная структура естественной конвекции в некоторый момент времени. Видно, что структура пристеночного слоя неоднородна вдоль поверхности пластины.

### 3. Управление конвективным теплоотводом с помощью электрического ветра

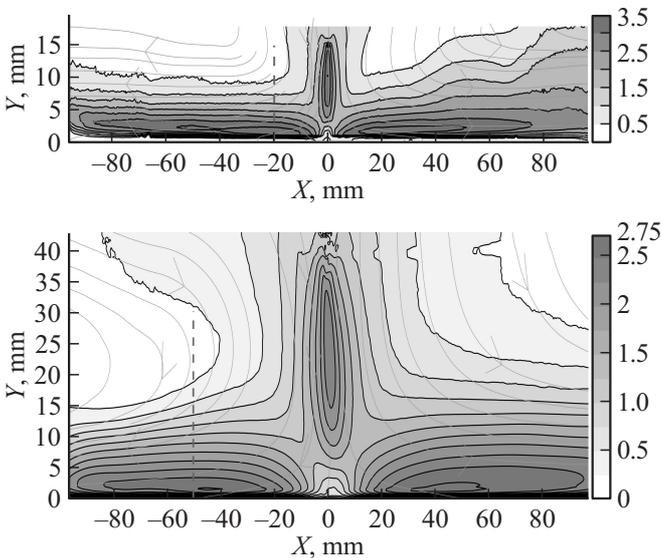
Для основной части исследований электрического ветра, которые приводятся в настоящей работе, было выбрано горизонтальное расположение пластины лицевой стороной наверх. Провод располагался параллельно пластине в ее центре, как показано выше на рис. 1. В этом случае воздушное течение, являющееся комбинацией электрического ветра и естественной конвекции, более стабильно. Напомним, что в экспериментах фиксировался средний перегрев пластины на уровне 65 К. Варьировались полярность и величина напряжения, приложенного к проводу, а также межэлектродное расстояние. На рис. 4 приводятся вольт-амперные характеристики коронного разряда для различных межэлектродных расстояний, имеющие характерную параболическую форму. При отрицательной полярности значения тока немного выше. При увеличении межэлектродного расстояния растет пороговое напряжение зажигания коронного разряда. Одновременно с возникновением разряда образуется электрический ветер, скорость которого определяется ионным током.

Здесь необходимо отметить, что отрицательная корона на проводе имеет очаговый характер, горит нестабильно и неравномерно, что неоднократно подтверждалось экспериментально [4]. Это приводит к тому, что струи электрического ветра, исходящие от отдельных очагов, взаимодействуют друг с другом, и результирующее течение оказывается довольно нестабильным и хаотичным. Поэтому экспериментальное исследование таких течений затруднено. На моментальных кадрах, один из которых приводится на рис. 5 (напряжение  $U = 12 \text{ kV}$ , ток  $I = 210 \mu\text{A}$ , расстояние между электродами  $d = 15 \text{ mm}$ ), можно наблюдать отдельные струйки воздуха, возникающие от очагов коронного разряда и направленные к нагретой пластине (рассматривается сечение вдоль провода). Динамический пограничный слой у поверхности пластины, характерный для естественной конвекции, полностью разрушается, а локальные скорости электрического ветра существенно выше. Поэтому, несмотря на нестабильность течения, эффективность охлаждения пластины существенно увеличилась (показано ниже на рис. 9). Конкретно для этого случая отводимая конвективная составляющая тепловой мощности составила  $W_{iw} = 43 \text{ W}$ , что значительно превосходит величину тепла, отводимого за счет естественной конвекции, и при горизонтальном, и при вертикальном расположении пластины.

При положительной полярности чехол коронного разряда равномерно облегает поверхность провода [4], что приводит к равномерному распределению потока ионов, выходящих из чехла, поэтому распределение объемной силы в направлении вдоль провода однородно. Возникающие при этом воздушные течения формируют общую стабильную струю электрического ветра, направленную



**Рис. 5.** Мгновенное распределение скорости (m/s) электрического ветра в вертикальной плоскости сечения, проходящей через ось провода, при отрицательной полярности. Пластина —  $Y = 0$ , провод —  $Y = 15$  mm.



**Рис. 6.** Распределение скорости электрического ветра (m/s) в вертикальной плоскости сечения, перпендикулярной оси провода, при положительной полярности.  $U = 13.5$  kV,  $I = 230$   $\mu$ A,  $d = 15$  mm — сверху;  $U = 26$  kV,  $I = 110$   $\mu$ A,  $d = 40$  mm — снизу.

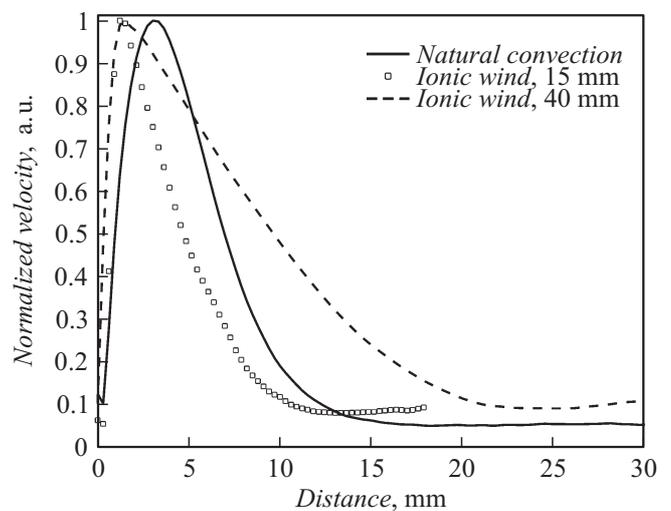
от провода к нагретой пластине. Ее размеры и значения скорости зависят от напряжения и межэлектродного расстояния, однако структура течения в общем случае имеет характерный вид, представленный на рис. 6 для поперечного сечения в центре провода. Эти распределения соответствуют двум различным межэлектродным расстояниям:  $d = 15$  и  $d = 40$  mm. Можно отметить зону ускорения у провода, зону равномерного течения в центральной струе и зону торможения, когда струя сталкивается с плоскостью. После столкновения с пластиной струя электрического ветра расходится в стороны и течет вдоль пластины со скоростью около 3.5 m/s (для  $d = 15$  mm), что значительно больше, чем при естественной конвекции (рис. 2). Эти быстрые

боковые струи позволяют эффективно отводить тепло от нагретой поверхности.

Боковые струи без заметного снижения скорости охватывают всю поверхность пластины, полностью разрушая динамический пограничный слой, характерный для естественной конвекции, и равномерно ее охлаждая. Отводимая конвективная составляющая тепловой мощности  $W_{iw}$  при этом равна 42 и 37 W для  $d = 15$  и 40 mm соответственно. В последнем случае струя получается более широкой, максимальное значение скорости вблизи нагретой поверхности ниже.

Структура течения у поверхности нагревателя оказывает непосредственное влияние на характеристики теплоотвода. На рис. 7 приводятся нормированные на максимальное значение профили скорости течения в динамическом пограничном слое при естественной конвекции от вертикальной пластины и в боковой струе электрического ветра, которые соответствуют приведенным выше на рис. 2 и рис. 6 пространственным распределениям (штрихами отмечены линии, вдоль которых построены профили). Максимум скорости в последнем случае располагается значительно ближе к поверхности нагретой пластины, что приводит к существенной интенсификации теплоотвода.

На рис. 8 приводится полученное с помощью тепловизора линейное распределение температуры по поверхности нагревателя вдоль направления течения боковых струй для эксперимента с электрическим ветром, соответствующего случаю, рассмотренному на рис. 6 при  $d = 15$  mm (вдоль координаты  $X$  при  $Y = 0$ ). Минимум температуры соответствует месту соударения центральной струи электрического ветра с поверхностью пластины. Градиенты температуры невелики, диапазон изменения температуры составляет 4 K. Вся поверхность работает интегрально эффективно. Это связано с достаточно большой толщиной пластины и высокой теплопроводностью алюминия.



**Рис. 7.** Профили скорости в динамическом пограничном слое при естественной конвекции от вертикальной пластины и в боковой струе электрического ветра.

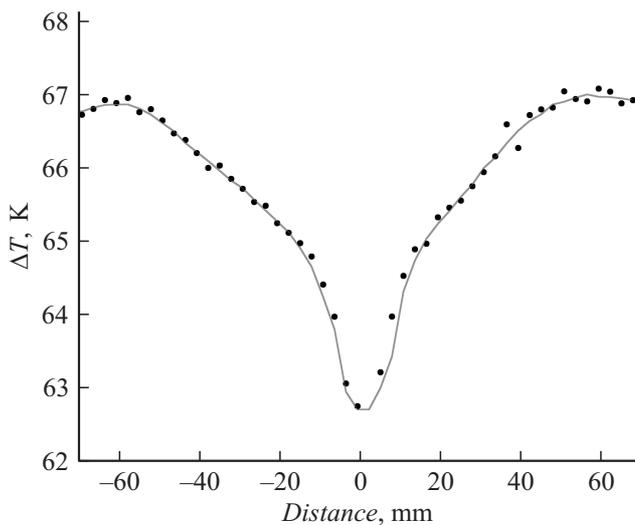


Рис. 8. Распределение перегрева вдоль поверхности пластины в сечении поперек проволочного электрода ( $U = 13.5$  kV,  $I = 230$   $\mu$ A,  $d = 15$  mm, положительная полярность).

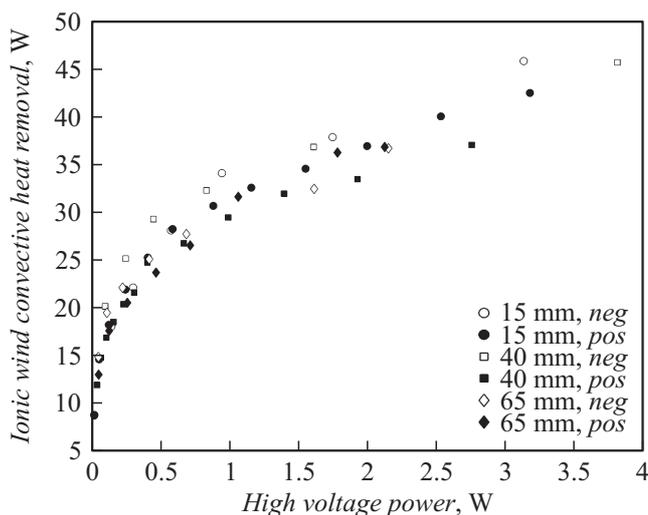


Рис. 9. Эффективность охлаждения горизонтально расположенной пластины с помощью электрического ветра.

Ниже представлены графики отводимой за счет электрического ветра конвективной тепловой мощности в зависимости от электрической мощности, затрачиваемой на поддержание коронного разряда, для различных межэлектродных расстояний и напряжений (рис. 9). Она достигает значения  $W_{iw} = 45$  W, что значительно больше, чем при использовании естественной конвекции (при горизонтальном расположении пластины  $W_{nch} = 5$  W, при вертикальном —  $W_{ncv} = 8$  W). Затрачиваемая электрическая мощность при этом не превышает  $W_{hv} = 4$  W. При больших напряжениях и токах тепла отводится больше, но расходование энергии становится менее эффективным. Стоит также отметить, что для разных межэлектродных расстояний и полярностей проволочного электрода характер зависимостей одинаковый, и общее

отличие между ними составляет не более 10–15%. Даже при малых напряжениях и токах, когда электрический ветер только начинает развиваться, отведение тепла становится более эффективным, чем при естественной конвекции для любых положений пластины.

#### 4. Заключение

Приведены результаты экспериментального исследования влияния электрического ветра от протяженного проволочного электрода на теплоотвод от нагреваемой поверхности при помощи современной установки лазерной анемометрии.

Показаны структуры динамического пограничного слоя при естественной конвекции у поверхности вертикальной и горизонтальной нагреваемой пластины, исследованы поля скоростей электрического ветра в системе электродов провод-плоскость в широком диапазоне напряжений при различных межэлектродных расстояниях для положительной и отрицательной полярностей.

При отрицательной полярности проволочного электрода корона на нем горит очагами, что приводит к сильной неустойчивости ЭГД-течений. Однако струи электрического ветра разрушают динамические пограничные слои у поверхности нагреваемой пластины, что существенно увеличивает теплоотвод с нее.

При положительной полярности короны структура потоков электрического ветра стабильна и однородна вдоль провода. Потоки электрического ветра существенно изменяют структуру динамического пограничного слоя у поверхности нагреваемой пластины по сравнению с естественной конвекцией и увеличивают в несколько раз отводимую мощность.

Скорости электрического ветра зависят от напряжения, тока, полярности и межэлектродного расстояния. Однако интенсивность теплоотвода в основном зависит от затрачиваемой на поддержание коронного разряда электрической мощности.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-08-07628 а, с использованием оборудования ресурсных центров „Геомодель“ и „Оптические и лазерные методы исследования вещества“ научного парка СПбГУ.

#### Список литературы

- [1] Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электроно-ионной технологии. М.: Энергоатомиздат, 1985. 160 с.
- [2] Bologa M.K., Grosu F.P. // Surf. Eng. Appl. Elect. 2012. Vol. 48. N 5. P. 456–464.
- [3] Корчемкин И.Н., Стишков Ю.К. // Proc. of the 5<sup>th</sup> International conference on materials science and condensed matter physics and of Symposium „Electrical methods of materials treatment“. Chisinau, Moldova, 2010. P. 266.
- [4] Самусенко А.В., Стишков Ю.К. Электрофизические процессы в газах при воздействии сильных электрических полей. Уч.-метод. пособие. СПб.: ВВМ, 2012. 649 с.

- [5] Wang H.-C., Jewell-Larsen N.E., Mamishev A.V. // Appl. Therm. Eng. 2013. Vol. 20. N 1–2. P. 190–211.
- [6] Jewell-Larsen N.E., Ran H., Zhang Y., Schwiebert M.K., Honer K.A. // Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. 2009. P. 261–266.
- [7] Chen I.Y., Guo M.-Z., Yang K.-S., Wang C.-C. // Int. J. Heat and Mass Tran. 2013. Vol. 57. N 1. P. 285–291.
- [8] Moreau E. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. Vol. 40. N 3. P. 605–636.
- [9] Tsubone H., Ueno J., Komeili B., Minami S., Harvel G.D., Urashima K., Ching C.Y., Chang J.S. // J. Electrostat. 2008. Vol. 66. N 1–2. P. 115–121.
- [10] Ashikhmin I., Stishkov Y.K., Yakovlev V. // Int. J. Environ. Sci. Tech. 2015. Vol. 9. N 1. P. 13–17.
- [11] Niewulis A., Podliński J., Berendt A., Mizeraczyk J. // Int. J. Environ. Sci. Tech. 2014. Vol. 8. N 1. P. 60–71.
- [12] Samusenko A., Stishkov Y., Zhidkova P. // Int. J. Environ. Sci. Tech. 2015. Vol. 9. N 1. P. 24–28.
- [13] Adamiak K. // J. Electrostat. 2013. Vol. 71. N 4. P. 673–680.
- [14] Елагин И.А., Стишков Ю.К. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 9. С. 15–19.
- [15] Гебхарт Б., Джалурия И., Махаджан Р., Саммакия Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. Кн. 1. Пер. с англ. / Под ред. О.Г. Мартыненко. М.: Мир, 1991. 678 с.