

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра радиофизики

Направление «Прикладные математика и физика»



Исследование охлаждения нагретой пластины электрическим ветром от системы игольчатых электродов

Бакалаврская работа студента
дневного отделения
_____ **Марковского Павла Юрьевича**

Научный руководитель:
_____ ст. преп. **Елагин Илья
Александрович**

Рецензент:
_____ **Ашихмин Илья
Алексеевич**

Санкт-Петербург

2017

Оглавление

Введение	3
1. Обзор литературы	5
2. Экспериментальная установка	8
2.1. Исследуемые системы электродов	8
2.2. Методика проведения эксперимента	10
2.2.1 Вольтамперные характеристики	10
2.2.2 Кинематические структуры течения.....	11
2.2.3 Охлаждение пластины.....	14
3. Система электродов с 1 иглой	17
3.1 Вольтамперные характеристики.....	17
3.2 Кинематические структуры	18
3.3 Охлаждение пластины.....	23
4. Система электродов с 6 иглами.....	27
4.1 Вольтамперные характеристики.....	27
4.2 Зажигание коронного разряда	30
4.3 Предварительное моделирование.....	31
4.4 Кинематические структуры	35
4.5 Охлаждение пластины.....	41
Заключение.....	45
Список литературы.....	46

Введение

В современном технологическом мире зачастую возникает прикладная задача охлаждения элементов технических устройств, так как охлаждение под действием естественной конвекции происходит недостаточно эффективно. Среди методов внешней интенсификации теплообмена существует достаточно перспективный – электрический ветер, выгодно выделяющийся простотой конструкции и отсутствием движущихся механических частей. Электрический ветер – явление направленного движения воздуха, возникающее при горении коронного разряда. В последние годы появилось достаточное количество работ, описывающих применение электрического ветра для охлаждения. Кроме того, ведутся работы по усовершенствованию компьютерных моделей, описывающих явление электрического ветра. Для верификации этих моделей необходима база экспериментальных данных, охватывающая различные конфигурации исследуемой системы, которая позволит определить границы применимости модели.

Получение качественных экспериментальных данных – весьма сложная задача, и её проблематика растёт с усложнением экспериментальной системы. В рамках курсовых и дипломных работ студентов нашего образовательного направления [1,2] на базе ресурсного центра «Геомодель» СПбГУ уже были получены экспериментальные данные по использованию электрического ветра для охлаждения в электродных системах провод-плоскость и игла-плоскость. Следующим этапом становится данная работа, охватывающая систему электродов ряд игл – плоскость. Для корректной оценки и объяснения процессов горения коронного разряда и возникновения электрического ветра необходимо помимо данных, количественно характеризующих охлаждение, получить также кинематические структуры течения электрического ветра. Получение такого рода данных возможно при использовании метода лазерной анемометрии – PIV-метода. Таким образом, целью данной работы является исследование охлаждения протяженного нагревателя электрическим ветром от перспективной системы электродов иглы-плоскость и получение экспериментальной базы для верификации компьютерных моделей. Для достижения целей в работе решались следующие задачи:

1. Изучение и улучшение экспериментального макета для исследования охлаждения пластины при помощи электрического ветра.
2. Усовершенствование методики построения распределения скорости в случае протяженного течения.

3. Частичное расширение имеющихся экспериментальных данных для системы электродов игла-плоскость

4. Исследование кинематической структуры электрического ветра положительной и отрицательной полярностей для системы электродов ряд игл-плоскость.

5. Оценка эффективности охлаждения перегретой пластины электрическим ветром для системы электродов ряд игл-плоскость, сравнение с другими электродными системами.

В данной работе приведены экспериментальные результаты исследования явления электрического ветра и их анализ.

1. Обзор литературы

Общее описание явления электрического ветра дается в работе [3]. В зоне чехла коронного разряда в воздухе образуются ионы, перемещаясь во внешней зоне разряда, они передают свой импульс нейтральным молекулам, вызывая появление довольно интенсивных воздушных потоков, которые и называются электрическим ветром. Приведено, что при напряжениях меньше пробивного, зависимость скорости ветра от корня квадратного из тока, как при положительной, так и при отрицательной полярности имеет линейный характер. Потоки электрического ветра могут быть эффективно использованы для охлаждения перегретых частей технических устройств. Проблеме интенсификации теплообмена при помощи электрического ветра посвящено большое количество работ [4–7], а в работах [5,6] показано, что при помощи электрического ветра от игольчатых электродов можно существенно влиять на пристеночный тепловой слой от вертикальной нагреваемой пластины. Более широко в литературе освещено использование электрического ветра в микромасштабах, например [8,9], а не с протяженным противоз электродом, как в данной работе.

В уже упомянутой работе [1] рассмотрен процесс естественной конвекции для используемого нагревательного стенда, также представлены результаты охлаждения нагревателя электрическим ветром и их анализ для системы электродов провод-плоскость. Кроме того, проведено сравнение экспериментальных результатов с компьютерным моделированием для случая естественной конвекции, проведено моделирование тепловой задачи при воздействии электрического ветра, задаваемого как объемная сила. Рассмотрены структуры течений и эффективность охлаждения нагревателя. Аналогичным образом проведено экспериментальное исследование электрического ветра и охлаждения в системе электродов игла-плоскость в работе [2]. Также комплексное исследование данной системы электродов в случае наклона игольчатого электрода представлено в [10].

Существует ряд научных работ, посвященных упрощенному компьютерному моделированию электрического ветра [11-13]. Среди этих работ можно отметить и [14], где рассматривается сравнение экспериментальных данных и моделирования для уже упомянутой системы электродов провод – плоскость.

Кроме того, существует ряд работ, в которых в несколько других аспектах была рассмотрена электродная система ряд игл-плоскость. Например, в работе [15] экспериментально при помощи теневого метода рассмотрено влияние взаимного расположения ряда игла и нагревательного противоэлектрода при вертикальной ориентации последнего на структуру течения воздуха и теплоотвод. Важно учитывать, что при близком взаимном расположении высоковольтных электродов с большой кривизной поверхности заметно проявляется эффект самогашения коронного разряда. Это явление экспериментально рассмотрено в работах [16,17]. Показано, что начиная с некоторого расстояния между ними, игольчатые электроды влияют друг на друга, перераспределяя напряженность электрического поля, что также приводит и к изменению условий возникновения явления электрического ветра как такового. В этих работах использована оптимальная с точки зрения расхода воздуха система электродов ряд игл-щель, что позволяет частично опираться на полученные результаты, но требует получения данных для исследуемой системы электродов.

Использование различных конфигураций системы игольчатых электродов и применение таких систем для охлаждения протяженной пластины рассмотрено в работе [18]. Авторами рассмотрено охлаждение рядом конфигураций игольчатых электродов, проварьированы такие параметры системы, как напряжение высоковольтного электрода (а с ним и потребляемая мощность) и расстояние от игольчатых электродов до плоскости. В работе показано, что для каждой конфигурации электродов существует такой набор параметров, который создает максимум эффективности охлаждения. Однако, выбор фиксированного набора электродных конфигураций оставляет без внимания такой параметр, как расстояние между игольчатыми электродами. Кроме того, в ходе работы получены только оценки эффективности охлаждения, а влияние конфигурации на кинематические структуры течения не рассматривалось.

Так как интенсификация теплообмена при помощи электрического ветра происходит за счет ускорения и утончения поверхностных слоев течения, важно регистрировать и анализировать поля скоростей течения воздуха. В последние годы в целом, и в данной работе в частности для визуализации течения в воздухе используется метод лазерной анемометрии – PIV метод, принцип работы которого будет описан далее. В работе [19] описаны результаты применения данного метода получения экспериментальных данных при использовании различных типов визуализирующих включений. Авторами было показано, что масла и микросферы EMS нельзя использовать в исследовании электрического ветра, поскольку они практически на порядок изменяют величину протекающего тока в системе. Кроме того, при введении некоторых безразмерных критериев оценки было определено, и подтверждено в работе [20], что для исследования электрического ветра подходят распыленные частицы DEHS (диоктиловый эфир себациновой кислоты). Размер частиц при распылении стандартным генератором аэрозоля, поставляемым в комплекте с установкой, и прочие параметры позволяют использовать данное вещество для исследования. Кроме того, делается вывод о том, что искажениями, вносимыми визуализирующими частицами DEHS в исследуемую систему, можно пренебречь.

2. Экспериментальная установка

2.1. Исследуемые системы электродов

В данной работе проведены эксперименты по изучению явления электрического ветра в воздухе для нескольких систем электродов. Первая часть опытов была проведена для системы электродов игла – плоскость, для фиксации иглы использовался пластиковый держатель (рис.1). Использовалась стальная игла с радиусом кривизны острия 0.1 мм. В роли противоэлектрода выступает алюминиевая пластина размерами 190x110x6мм. Для устранения возможности возникновения коронного разряда на пластине, её края скруглены. Для проведения экспериментов была выбрана величина межэлектродного промежутка 20 мм, так как для такого расстояния имеется обширный набор данных в более ранних работах [2], кроме того это расстояние позволяет получить устойчивые течения воздуха.



Рис. 1. Игла в держателе и пластина - противоэлектрод.

Для исследования системы нескольких игольчатых электродов был изготовлен специальный держатель (рис. 2), который представляет собой две алюминиевые пластины, стягиваемые болтами. К одной из пластин закреплен прямоугольник поролонового уплотнителя, для надежного закрепления игл. Для упрощения схемы подключения непосредственно держатель являлся элементом высоковольтной цепи. Во избежание возникновения коронного разряда на самом держателе все углы были скруглены с большим радиусом, а клеенный разъем покрыт слоем непроводящего термокля. Для оценки влияния массивного металлического держателя проведен ряд опытов с одиночной иглой в данном держателе, результаты будут описаны далее.

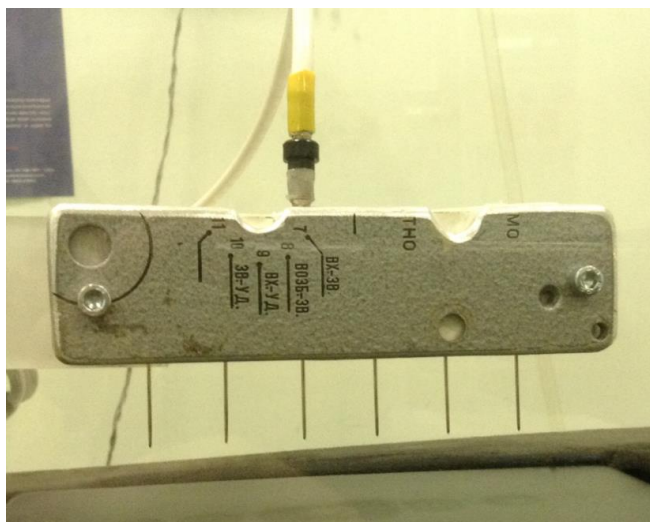


Рис. 2. Система игл в металлическом держателе.

Для исследования системы электродов ряд игл – плоскость было отобрано 6 игл с наиболее близким радиусом закругления (рис. 3), также в эти 6 игл входит та, исследования с которой были проведены как с одиночным электродом. Разброс в радиусе кривизны кончиков игл не превышает 15%. Так как исследуемая система электродов имеет большое количество свободных параметров, например, расстояние от игл до плоскости, расстояние между иглами, количество игл, их взаимное расположение, некоторые параметры необходимо было зафиксировать. В первую очередь, расстояние от игл до плоскости было выбрано равным 20 мм, для получения устойчивых стационарных течений и для корректного сравнения с полученными ранее результатами. Также фиксировано было число игл – 6 штук, и взаимная конфигурация – кончики иглы выставлялись на одинаковом расстоянии от плоскости, иглы располагались в одной плоскости на одинаковом расстоянии друг от друга. Таким образом, варьируемым параметром выбрано было расстояние между кончиками игл, оно изменялось в пределах от 1 мм (система вплотную расположенных игл, 1 мм – диаметр основания иглы) до 28 мм (что соответствует максимально широкому распределению игл вдоль поверхности пластины).

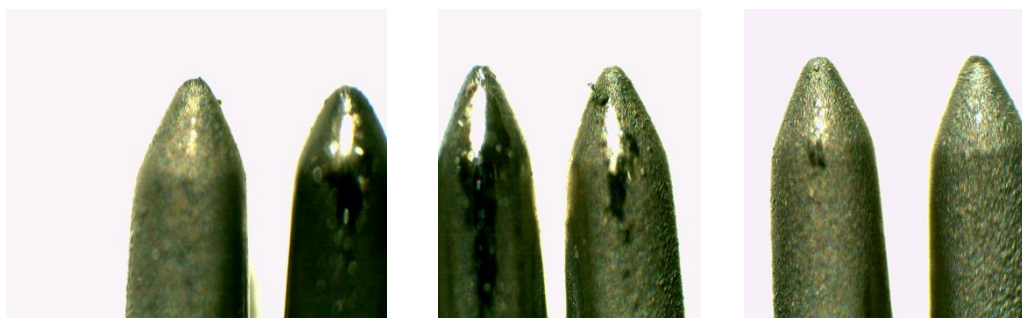


Рис. 3. Фото системы игл, покрытых сухим графитом.

2.2 Методика проведения эксперимента

При исследовании электрического ветра были получены следующие типы данных: осциллограммы токов и напряжений, поля скоростей течения, распределения температуры, зависимости отводимо тепловой мощности.

2.2.1 Вольтамперные характеристики

Осциллограммы тока и напряжения получены при помощи АЦП и делителей с известными сопротивлениями. Для измерения напряжения, подаваемого с высоковольтного источника, используется делитель, понижающий напряжение на 4 порядка до значений, не превышающих предел измерений АЦП, ток измеряется как падение напряжения на резисторе известного сопротивления (8.2 кОм), находящемся в цепи между пластиной-противоэлектродом и землей. Такая конструкция высоковольтной части установки представляется наиболее простой, но в случае использования нескольких игольчатых электродов позволяет измерять только суммарный ток, протекающий в схеме. Существует обратная схема, позволяющая измерить ток через каждую иглу – можно подавать высоковольтный потенциал на пластину, а заземлять каждую иглу в отдельности. Но такой вариант подключения сильно затруднит проведение экспериментов при малых расстояниях между игольчатыми электродами, поэтому был использован описанный выше метод. Регистрация вольтамперных характеристик систем электродов необходима для понимания и описания явления электрического ветра, например, во многих источниках [3] отмечается линейная зависимость скорости основной струи электрического ветра от квадратного корня тока, протекающего через систему, эта зависимость также подтверждается экспериментально.

2.2.2 Кинематические структуры течения

Для получения полей скоростей течений воздуха использовался метод лазерной анемометрии по изображениям частиц (англ. *Particle Image Velocimetry*, сокращенно *PIV*), позволяющий получать и предварительно обрабатывать поле скоростей в автоматическом режиме. Измерения поля скоростей производились при помощи установки FlowMaster от компании LaVision ресурсного центра "Геомодель" СПбГУ. В состав установки входит двухимпульсный лазер, генератор аэрозоля визуализирующих частиц, высокочувствительная камера. Суть метода заключается в определении наиболее вероятного смещения взвешенных в воздухе частиц. Для этого при помощи цилиндрической линзы луч лазера сводится к плоской поверхности, высвечивающей частицы в воздухе. Два импульса лазера с известной временной задержкой между ними соответствуют двум кадрам, получаемым с помощью камеры. Затем эти два кадра обрабатываются с помощью поставляемого в комплекте ПО DaVis, для верной обработки временной промежутков между кадрами выбирается таким образом, чтобы смещений частиц под действие течения было больше одного пикселя, но меньше четверти размера поискового окна (48x48 либо 32x32 пикселя).

Полученные кадры разбиваются на обозначенные поисковые окна, и к ним применяется функция кросс-корреляции – двумерная свертка дискретных сигналов:

$$R(x, y) = \sum_{i=0}^H \sum_{j=0}^W I_{t_1}(i, j) I_{t_2}(i + x, j + y)$$

Максимум этой функции определяет наиболее вероятное смещение частиц в пределах поискового окна, а зная временную задержку между кадрами, можно определить и скорость потока частиц (а значит и воздуха). Такая обработка проводится в несколько итераций, исключая не укладывающиеся в статистику значения, с последовательным уменьшением поискового окна. Кроме того, для каждого измерения записывалась не одна пара кадров, а 50-100, и значения скорости усреднялись. Как уже было упомянуто, в работе [19] были определены наиболее пригодные для использования в качестве визуализирующих включений вещества, а в работе [20] показано, что использование DEHS вносит в систему пренебрежимые искажения. Поэтому погрешностью метода будем считать статистическую погрешность, возникающую при усреднении данных, а она не превышает 10%.

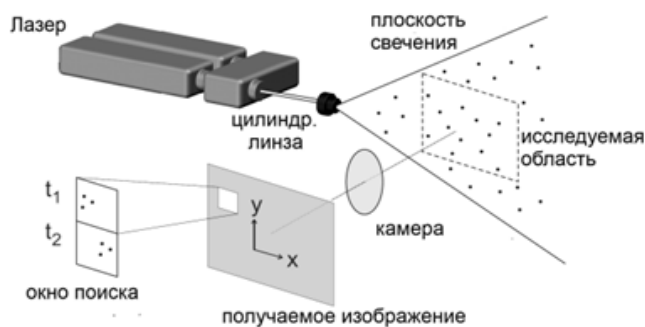


Рис. 4. Схема установки для PIV-метода.

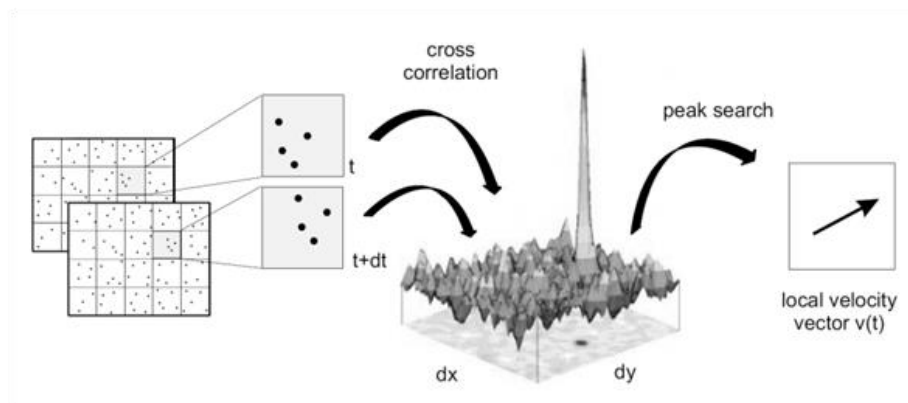


Рис. 5. Принцип работы PIV-метода.

Для проведения экспериментов был спроектирован и изготовлен на заказ прозрачный измерительный бокс из оргстекла, позволяющий наблюдать за исследуемой системой, выводить наружу все необходимые провода, не допуская распространения аэрозоля визуализирующих частиц по помещению. Также бокс имеет отдельный разъем для подключения высоковольтного источника, съемную стенку для удобного доступа к исследуемой системе, герметичные отверстия для подачи и откачки аэрозоля.

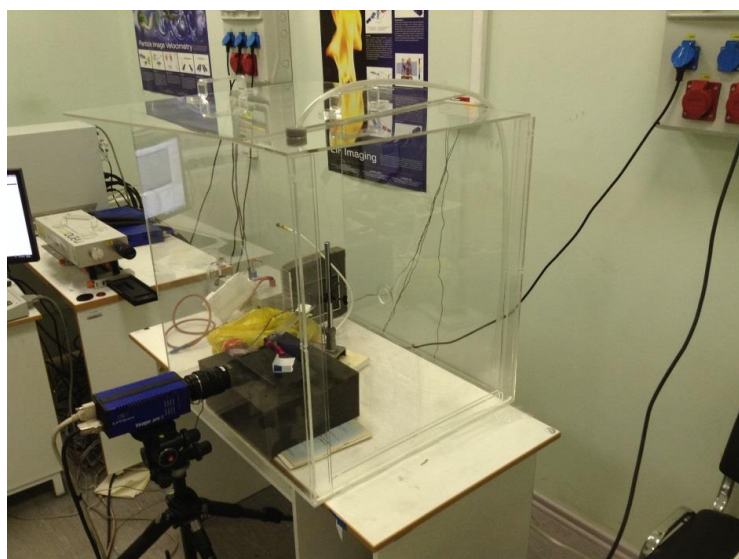


Рис. 6. Измерительный бокс.

Так как длина пластины нагревателя в большинстве опытов заметно превосходит межэлектродное расстояние, получение поля скоростей проводится в несколько кадров, которые затем требуется объединить в один массив данных. Для «склейки» отдельных кадров в несколько этапов был написан алгоритм, также использующий принцип свертки, и определяющий момент максимального совпадения скоростей. Качество работы алгоритм можно оценить по обработке содержащих несколько игольчатых электродов – расстояния между иглами на объединенном кадре соответствуют реальным с точностью до 0,5 мм при расстоянии между иглами 10-30 мм. Кроме того, для некоторых ситуаций используется алгоритм, объединяющий поля скоростей на основе указанных совпадающих опорных точек. Для оценки качества полученных данных использовалось сравнение потока вещества, определенного по полученным кинематическим структурам. Такой поток должен сохраняться вдоль пути распространения течения. Но использование такого подхода возможно только в электродной системе, обладающей симметрией, например одиночная игла-плоскость, и невозможно в системе электродов ряд игл-плоскость.

Так как при включении нагревателя существуют восходящие конвективные потоки течения, получение PIV-данных затруднено. В работе [1] и ряде экспериментов показано, что скорости этих потоков много меньше скоростей электрического ветра, поэтому при получении данных делается допущение, что структура течения ветра зависит от полярности и напряжения, а конвективные потоки влияют на нее слабо. В этом предположении кинематические структуры ветра можно получать без нагрева, а эксперименты по охлаждению проводить отдельно.

2.2.3 Охлаждение пластины

Нагреватель, также используемый как противоэлектрод, был собран Виталием Яковлевым, и подробно описан в его работе [1]. Поэтому представляется возможным лишь кратко описать его устройство. Противоэлектрод – пластина выполнена из алюминия и имеет размеры 190x110x6мм. В качестве нагревателя используется нихромовая проволока, закрепленная к текстолитовой пластине, расположенная под алюминиевой пластиной и изолированная от нее слюдяной пленкой. Нагревательный элемент питается от внешнего низковольтного источника. Кроме того, еще один источник используется для подачи напряжения на измерительные термисторы. 15 термисторов распределены по всей поверхности в текстолите, один служит для измерения температуры воздуха в помещении. Так как теплопроводность всех компонентов макета высока, с большой точностью можно считать, что температуры термисторов соответствуют температуре пластины. Для того чтобы с уверенностью говорить об охлаждении только лицевой стороны пластины, вся конструкция помещается в поролоновый кожух толщиной 100 мм. Измеряются падения напряжения на всех термисторах при помощи АЦП, и по градуировочной кривой переводятся в значения температуры. Надежность и корректность работы макета подтверждены в работах [1,2], показано, что погрешность получаемых данных о мощности нагревателя и температуре не превышает 5%, а погрешность определения температуры по сопротивлению термистора 1 К, что зачастую превосходит градиент температуры по поверхности пластины.

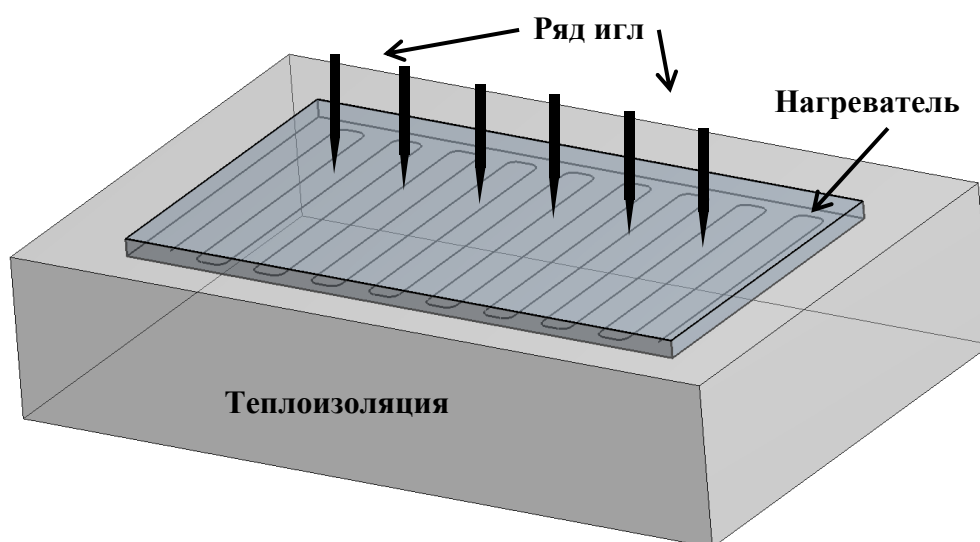


Рис. 7. Макет нагревателя и одна из систем электродов.

Все эксперименты по охлаждению, проводившиеся в рамках данной работы, выполнялись по методике, представленной в рамках работы [1]. При проведении эксперимента при помощи АЦП регистрируются падения напряжения на термисторах и измерительных резисторах, которые впоследствии пересчитываются в температуру в различных точках пластины, ток и напряжение в цепи нагревателя (для получения выделяемой мощности). Фиксированной величиной устанавливается перегрев пластины относительно воздуха, что позволяет также фиксировать такие величины, как потоки тепла, отводимые с пластины излучением и теплопроводностью в поролон и провода. Средняя по пластине величина перегрева установлена как 66,5 К, для полного сравнения с другими системами электродов в работах [1,2]. Для установления температуры необходимо достаточное время, в проводимых экспериментах оно было не менее 30 минут. Для того чтобы фиксировать температуру пластины, менялась подаваемая на нагреватель мощность, таким же образом была определена некая номинальная мощность, необходимая для поддержания необходимого перегрева в отсутствие электрического ветра. Эта мощность составляет порядка 25 Вт, что хорошо соотносится с данными эксперимента и моделирования из [1]. Из этой мощности, согласно моделированию и примерным расчетам, 10,5 Вт выделяются в качестве излучения, 5,2 Вт соответствуют естественной конвекции, остальное – поток тепла, уходящий в поролон и провода [1]. Соответствующим образом измеряется мощность нагревателя при фиксированном перегреве при наличии электрического ветра. Так как температура не изменилась, тепловые мощности, соответствующие теплопроводности и излучению, должны остаться фиксированными. Следовательно, если из текущей мощности нагревателя вычесть номинальную (за исключением мощности, соответствующей конвекции), получим как раз тепловую мощность, отводимую с пластины электрическим ветром. В последующих опытах наблюдались некие изменения номинальной мощности нагрева, не превышающие 3-4 Вт (порядка 10% от мощности), которые можно связать с изменением состояния поверхности нагревателя, например, электрический ветер создавал на сухой графитовой смазке более темное пятно. Поэтому, для получения более достоверных результатов, в пару каждому эксперименту с охлаждением электрическим ветром проводилось измерение номинальной мощности, и для вычисления отводимой ветром мощности использовались соответствующие значения.

В некоторых опытах для регистрации температуры поверхности используется тепловизор Fluke Ti32. Для выравнивания интенсивности излучения с поверхности пластины, а также для устранения бликов луча лазера, поверхность пластины

покрывается сухой проводящей графитовой смазкой. Однако при равномерно прогретой алюминиевой пластине через тепловизор наблюдался градиент температуры по поверхности. Это означает, что в результате проведения экспериментов с PIV-частицами, а также под действием напора электрического ветра, осаждающего на пластине взвесь из воздуха, пластина приобретает неоднородное распределение коэффициента серости. Для устранения этой проблемы было испробовано несколько вариантов покрытия, включающих также покрытие пластины сажей от горения керосина (с коэффициентом серости, визуально близким к 1), и несколько других. В ходе проведения опытов определен оптимальный алгоритм получения достоверных экспериментальных данных, который представляется более наглядным описать далее, приводя непосредственно результаты обработки.

3. Система электродов с 1 иглой

Исследованию системы электродов игла – плоскость и получению именно интересующих результатов посвящена достаточно обширная работа [2]. Поэтому в рамках данной работы не проводилось повторное получение результатов, а лишь дополнялись и расширялись результаты исследования.

3.1 Вольтамперные характеристики

Вольтамперные характеристики системы электродов для двух полярностей получение в динамическом режиме, с плавной модуляцией напряжения от 0 до примерно 3 кВ ниже напряжения пробоя, и приведены на рис. 8.

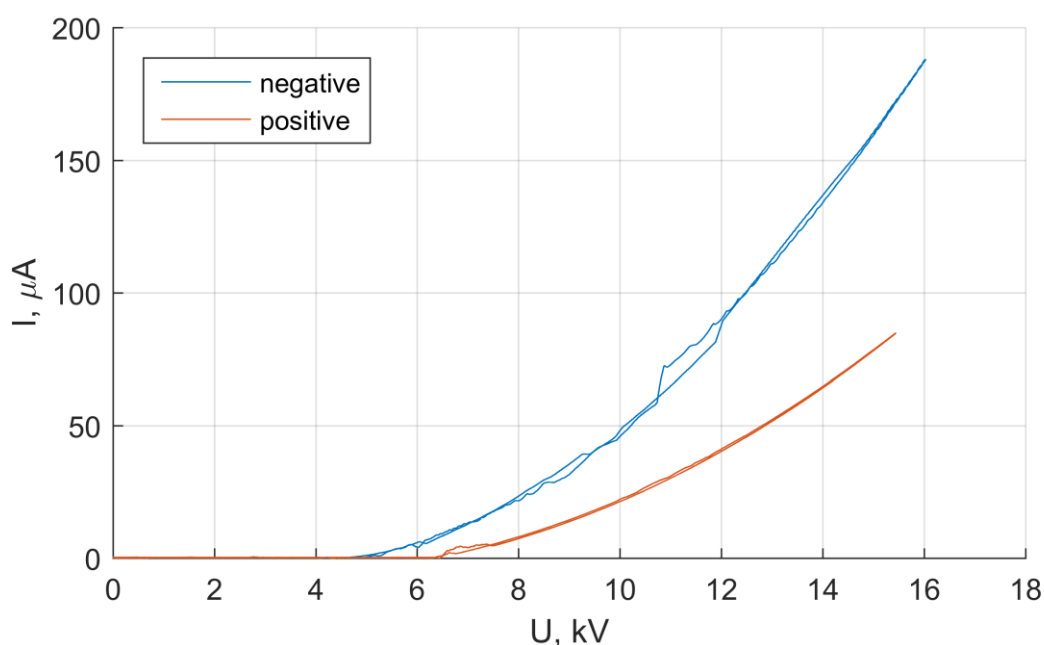


Рис. 8. ДВАХ системы электродов игла - плоскость.

Зависимости имеют характерный для коронного разряда в воздухе вид: некое пороговое значение напряжения, при котором начинается прохождения тока в системе, т.е. загорается коронный разряд, и параболическое нарастание тока с дальнейшим повышением напряжения. Прямой и обратный ход динамических характеристик практически совпадает, заметное количественное отличие при этом наблюдается в амплитуде тока при разных полярностях. Отличия в пороговом значении напряжения зажигания разряда и амплитуде токов объясняются различными механизмами переноса заряда в зоне несамостоятельного разряда при разных полярностях. Эти процессы подробно изучены и описаны во множестве литературных источников.

3.2 Кинематические структуры

Для сравнительного анализа различных систем электродов хотелось бы получить поля скоростей, охватывающие всю длину пластины, и иметь представление о том, как структура течения связана с охлаждением. Поэтому было решено расширить полученные в работе [2] данные. Для устранения бликов в луче лазера, активный электрод - игла покрывается сухой графитовой проводящей смазкой. Получение качественных данных, составленных из нескольких кадров, заняло большое количество времени из-за возникавших в ходе эксперимента проблем, но в результате был получен алгоритм постановки опыта, приводящий к наилучшему результату: перед каждой серией экспериментов внутренняя стенка измерительного бокса обезжиривается, а камера размещается таким образом, чтобы электрод – игла минимально попадала в кадр, это позволяет избежать засветки приэлектродной области. В ходе серии эксперимента снимаются последовательно кадры с минимальным перекрытием в 30 %, кадры предварительно обрабатываются с удалением внешних областей, устранением наклона (если таковой есть), для объединения используется двумерный алгоритм поиска минимума разности при наложении кадров. Суммарно, создан комплекс программ для обработки результатов PIV-экспериментов, позволяющий в полуавтоматическом режиме объединять кадры с высокой точностью. Результат объединения нескольких кадров приведен на рис. 9.

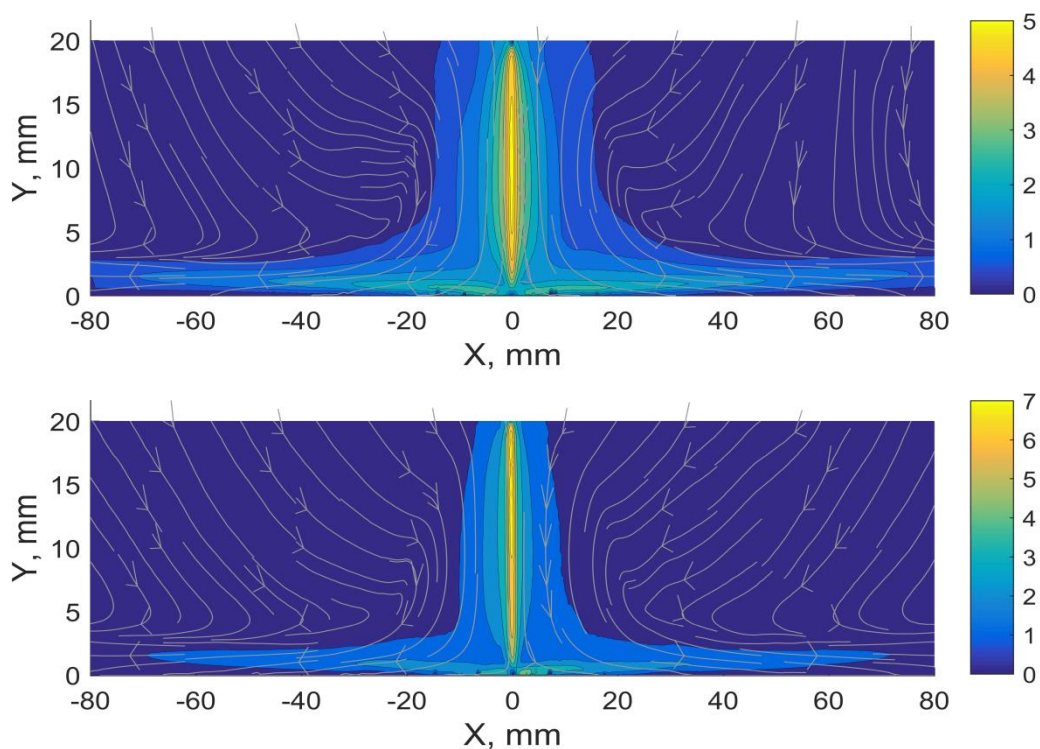


Рис. 9. Поля скорости для отрицательной (вверху) и положительной (внизу) полярности.

Данные для отрицательной и положительной полярностей соответствуют напряжениям 13,3 и 12,1 кВ, токам 27,1 и 22,2 мкА соответственно.

Полученные данные полностью соответствуют теоретическим представлениям о структуре течения электрического ветра – наблюдается зона ускорения, размер которой примерно равен 1-2 мм, зона стабильного течения, в которой скорость потока почти неизменна, и зона торможения при столкновении с противоэлектродом - пластиной.

Далее (рис. 10) приведен пример результата проверки полученных данных на сохранение потока вещества при помощи написанных алгоритмов. Такая проверка по одному сечению возможна, когда в исследуемой системе присутствует симметрия, в данном случае алгоритм опирается на осевую симметрию относительно центральной струи течения. Пользователем определяется точка в плоскости, автоматически строится симметричная ей относительно оси центральной струи точка. Обе точки соединяются профилями с рядом точек на оси центральной струи. В правой колонке выведены диаграммы потоков через эти сечения и относительной ошибки для них, которая не превышает 7 %, что можно считать хорошим экспериментальным результатом.

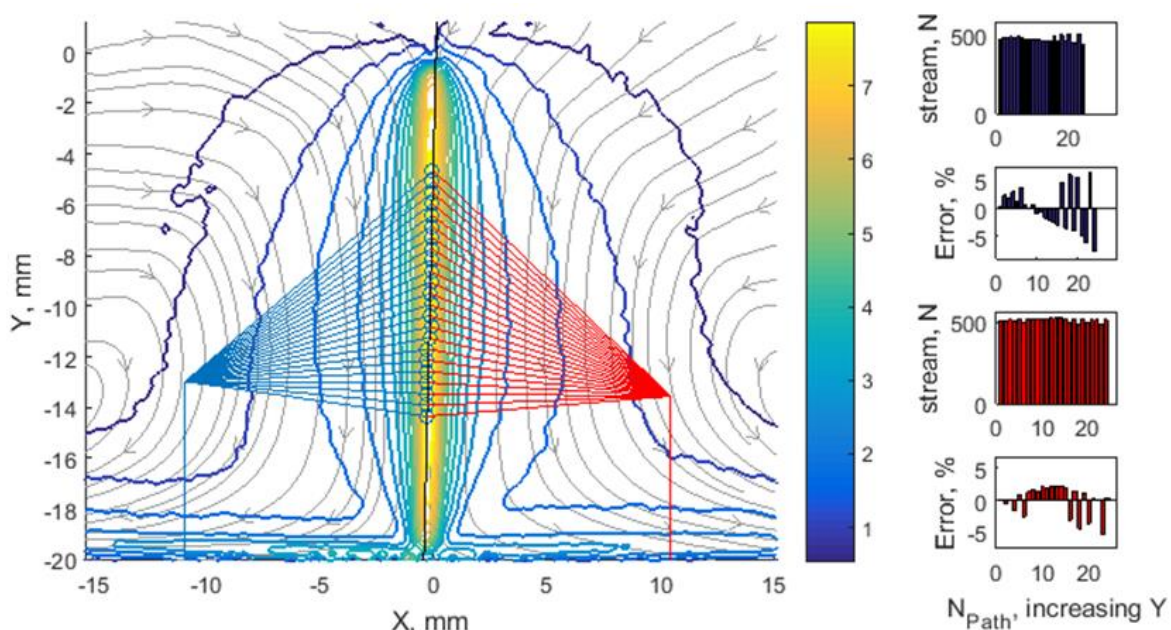


Рис. 10. Пример обработки поля скоростей.

Для сравнения структур течения при различных полярностях построим линейные графики модуля скорости вдоль оси течения и поперек оси на полувысоте. Для наглядности все зависимости нормированы на максимум.

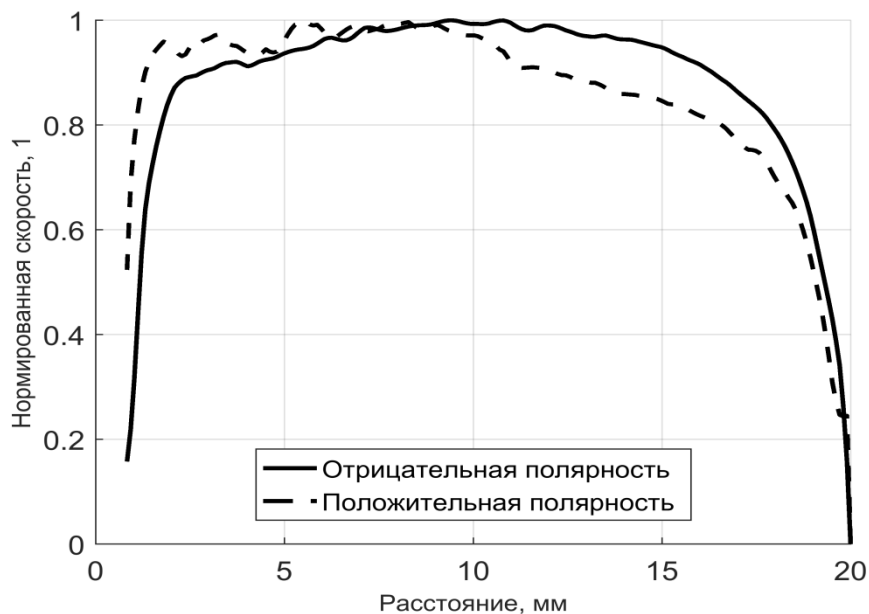


Рис. 11. Модуль скорости вдоль центральной оси течения.

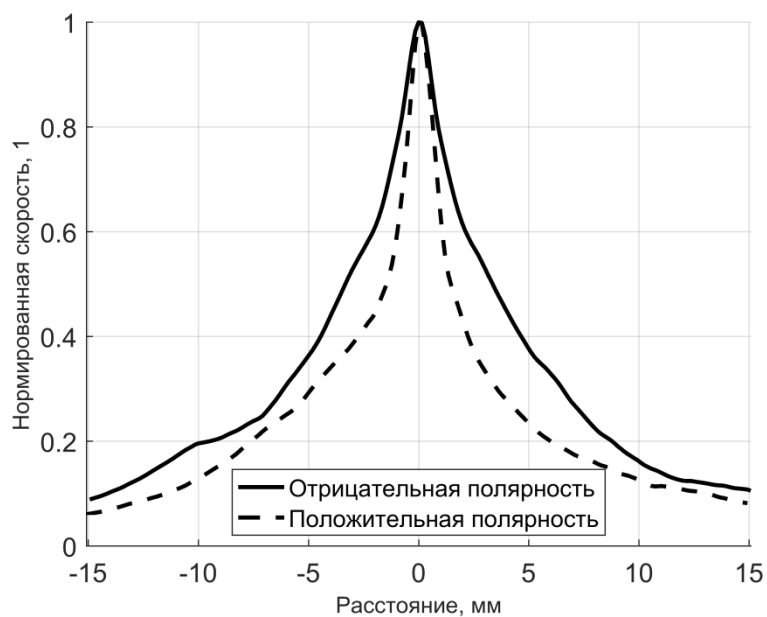


Рис. 12. Модуль скорости в поперечном сечении на высоте 10 мм.

Структура течения для двух полярностей практически совпадает, однако максимальная скорость выше для положительной полярности. При этом необходимо учитывать особенность метода проведения эксперимента – плоскость лазера имеет конечную толщину, и она составляет примерно 1 мм, что превосходит диаметр острия иглы. Следовательно, даже при максимально точном наведении луча лазера на иглу, будут также подсвечиваться и частицы в параллельных слоях, что при обработке приводит к размыванию максимума скорости. Такой результат был также описан и подтвержден в [11]. При отрицательной полярности носителями заряда в зоне

самостоятельного разряда являются электроны, подвижность которых значительно выше, чем ионов. Следовательно, при том же значении тока, концентрация движущихся частиц в зоне ускорения ниже, что приводит к уменьшению результирующей скорости струи. Кроме того, распространение электронного потока от иглы при отрицательной полярности происходит в более широкой области, что также приводит к уширению центральной струи потока. Обратная ситуация наблюдается при положительной полярности: коронный разряд принимает облегающую форму, и стабильно горит по всей активной поверхности электрода. Малая величина отличия в ширине центральной струи объясняется геометрией иглы: области горения очаговой и облегающей форм разряда практически совпадают (рис. 13).

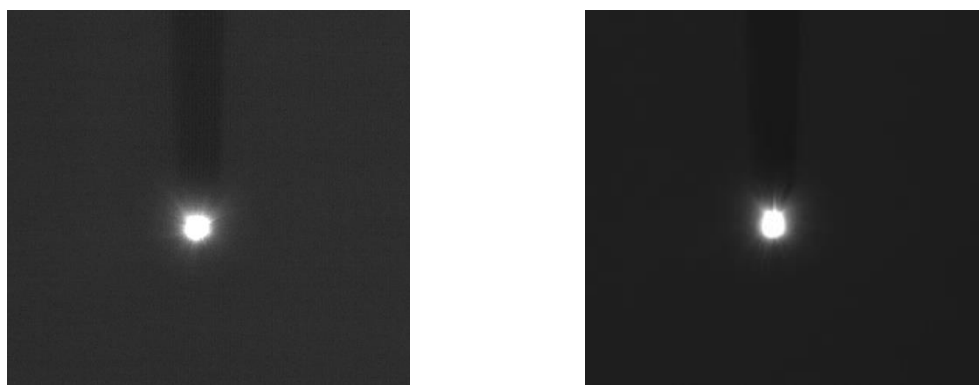


Рис. 13. Снимки коронного разряда при положительной (слева) и отрицательной

Независимо от полярности, электрический ветер образует не только основную струю, но и расходящиеся вдоль пластины потоки, скорость в которых радиально уменьшается вдоль всей пластины, тем не менее, поддерживая интенсивное течение. Для примера можно построить профиль скорости в боковом потоке, соответствующий координате $X = -30$ мм (рис. 14).

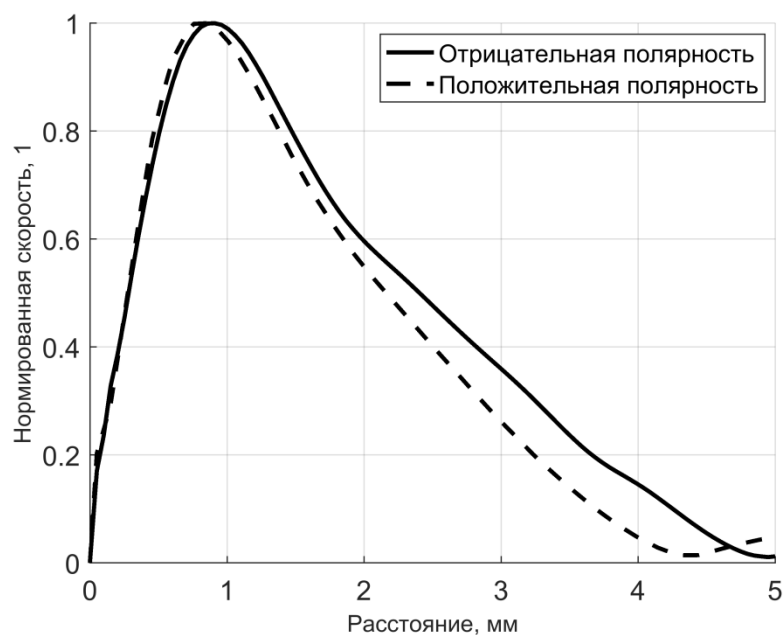


Рис. 14. Модуль скорости в сечении боковой струи при $X = -30$ мм.

Толщина такой боковой струи не превышает несколько миллиметров (максимум приходится на 1 мм) вдоль всей пластины, что меньше толщины слоя естественной конвекции при вертикальном расположении пластины [1], а значит, при нагреве пластины она активно разрушает пограничный тепловой слой, заметно увеличивая теплоотвод. Толщина струи увеличивается при удалении от центральной струи (рис. 15). Предполагается, что омывающие всю поверхность пластины боковые струи так же активно учувствуют в интенсификации теплоотвода, как центральная направленная струя электрического ветра.

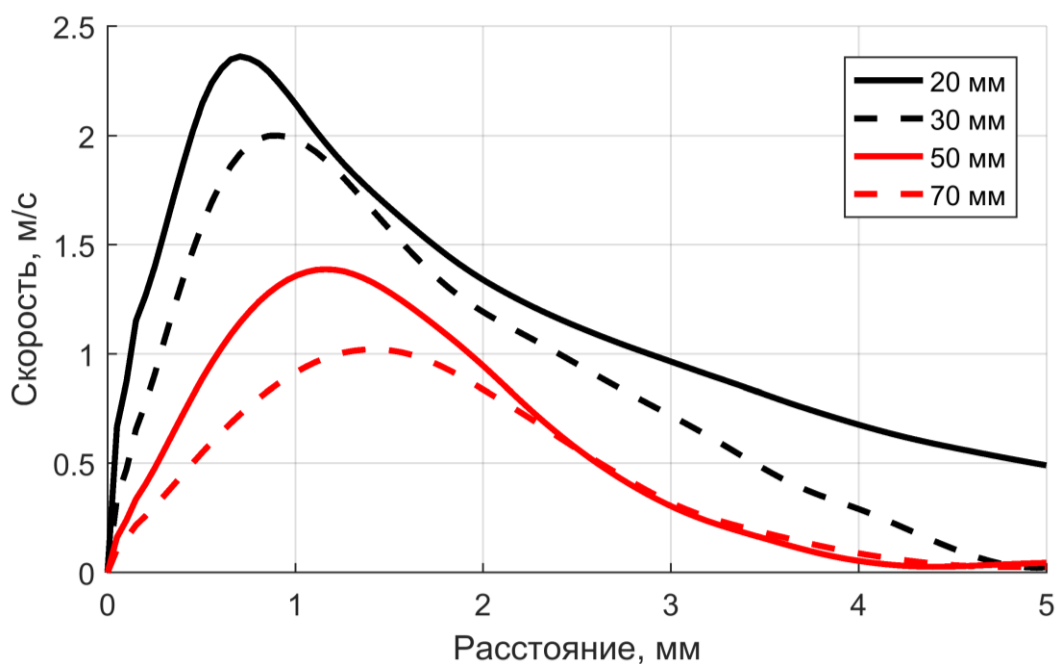


Рис. 15. Модуль скорости в сечении боковой струи различного расстоянии от центральной струи, отрицательная полярность.

3.3 Охлаждение пластины

В работе [2] была получена зависимость отводимой электрическим ветром от одиночной иглы тепловой мощности от затрачиваемой на поддержание разряда электрической мощности (рис. 16). В рамках данной работы не проводилось полное воспроизведение данных, отдельные эксперименты были проведены для проверки воспроизводимости результатов, отработки методики работы с тепловизором в более простой системе электродов, оценки точности определения температуры с помощью термисторов. О последнем хотелось бы сказать несколько подробнее.

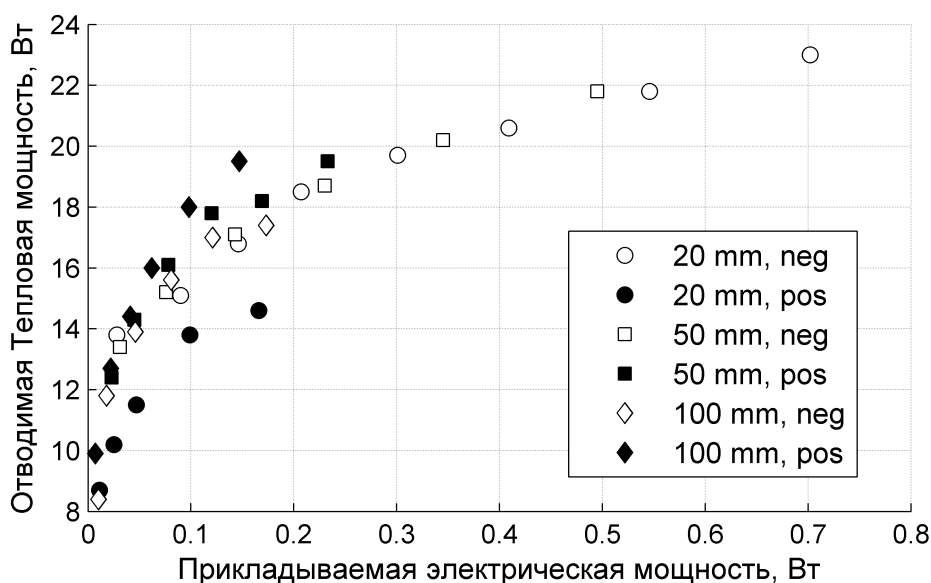


Рис. 16. Эффективность охлаждения нагревателя одиночной иглой при различных межэлектродных расстояниях и полярностях

Когда пластина охлаждается электрическим ветром от одиночного игольчатого электрода, область максимального теплоотвода располагается пятном непосредственно напротив активного электрода. 15 термисторов, расположенных в пластине равномерной сеткой, позволяют оценить не только температуру пластины, но и градиент перегрева. Однако стоит учитывать, что термисторы расположены в толщине макета, и хотелось бы убедиться, что определяемый с их помощью градиент температуры (2-3 К) соответствует градиенту температуры на поверхности пластины. Кроме того, при помощи тепловизора можно получить более детальную картину температуры поверхности пластины. Для верного определения температуры на поверхности был использован следующий метод: в качестве покрытия используется графитовая смазка, нанесенная на обезжиренную пластину; под действием электрического ветра на поверхности сухой пластины появляется пятно с

отличающимся коэффициентом серости (рис. 17); дальнейшие операции производятся в отсутствие электрического ветра; пластина нагревается до стационарной фиксированной температуры, определяемой по показаниям термисторов; делается снимок поверхности с помощью тепловизора, выставленное в приборе значение коэффициента серости не играет роли, но менять его нельзя; массив данных, соответствующий тепловому изображению пластины, делится на выставленное значение коэффициента серости и температуру пластины, таким образом, получено поверхностное распределение коэффициента серости по пластине (рис. 18); далее пластина охлаждается электрическим ветром; тепловой снимок охлаждаемой пластины поэлементно делится на распределение коэффициента серости – получено истинное распределение температуры по поверхности пластины (рис. 18).



Рис. 17 Фото пластины-противоэлектрода после воздействия электрического ветра.

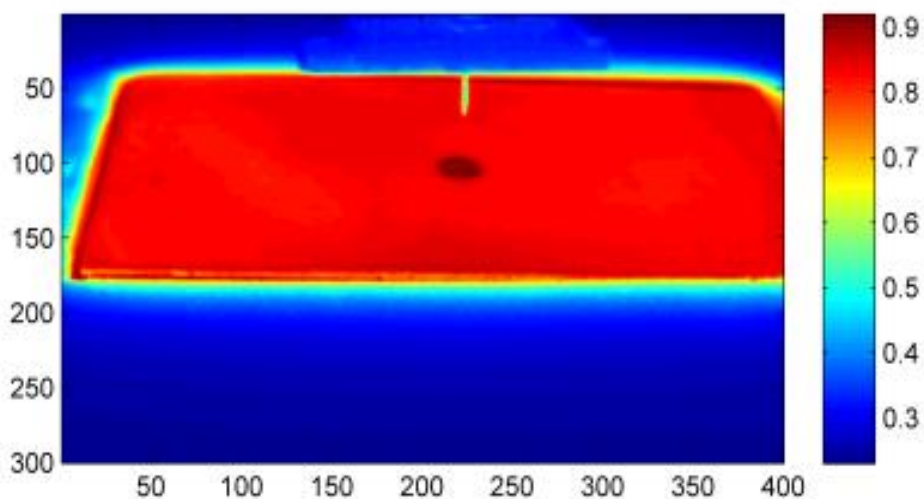


Рис. 18. Распределение коэффициента серости по поверхности пластины.

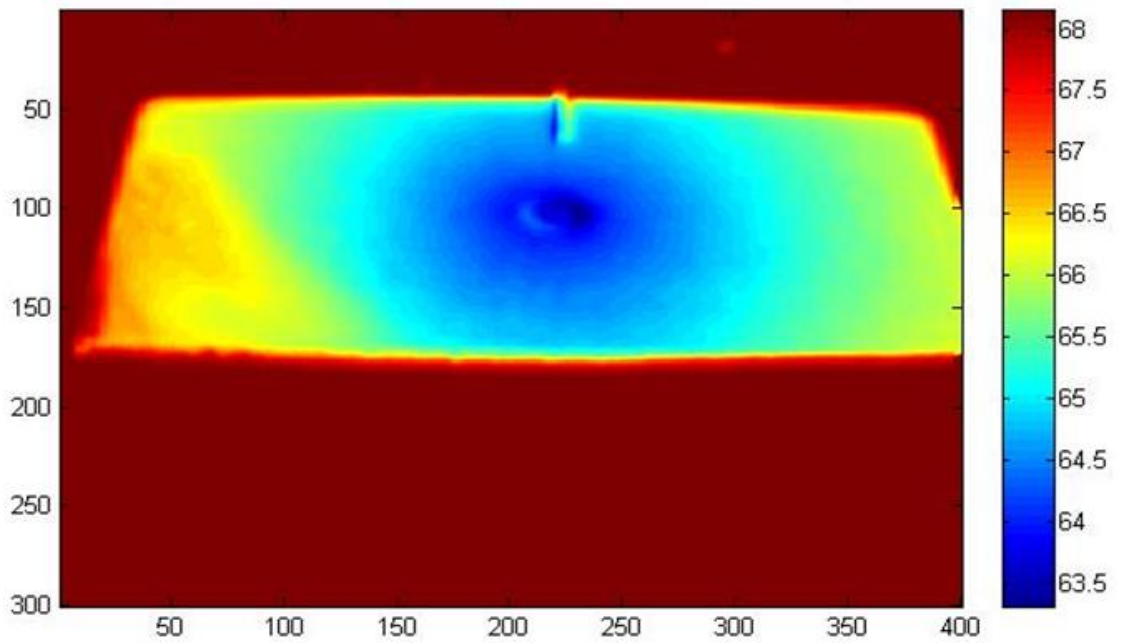


Рис. 19. Распределение температуры по поверхности пластины при охлаждении игольчатым электродом.

На шкале рис. 18 выведены значения коэффициента серости, обозначения вдоль осей – отсчеты на термограмме, для определения температуры еще одна термограмма снимается в том же положении тепловизора. Построим профиль температуры вдоль более протяженной оси симметрии пластины (рис. 20).

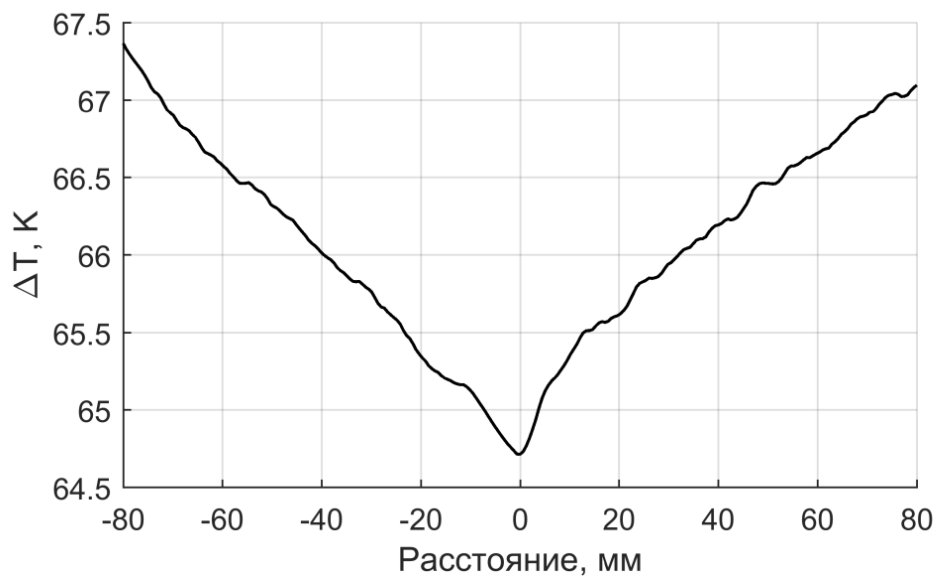


Рис. 20. Профиль температуры вдоль оси пластины.

На графике распределения коэффициента серости можно явно отметить более темное пятно непосредственно под иглой (также на рис. 17), которое, тем не менее, не создает дополнительной неоднородности температуры после обработки данных. По распределению температуры вдоль оси пластины можно определить, что точечное охлаждение от источника электрического ветра создает практически линейное распределение температуры по удалению от центра охлаждения. При этом градиент температуры на поверхности пластины не превышает 3 К. Очевидно, что область максимально эффективного охлаждения расположена в зоне столкновения струи электрического ветра с пластиной. Добавляя иглы, можно с очевидностью увеличить отводимую мощность.

4. Система электродов с 6 иглами.

4.1 Вольтамперные характеристики

При проведении экспериментов в системе электродов ряд игл – плоскость был использован массивный металлический держатель, подводящий высокое напряжение. Влияние эквипотенциального проводника на электрическое поле, а с ним и на коронный разряд, было решено оценить при помощи системы электродов игла – плоскость. Для этого был записан ряд вольтамперных характеристик такой системы при изменении расстояния, на которое игла выступает из держателя (рис. 21). Также на графике представлена подобная характеристика для иглы в использованном ранее пластиковом держателе, не искажающем поле.

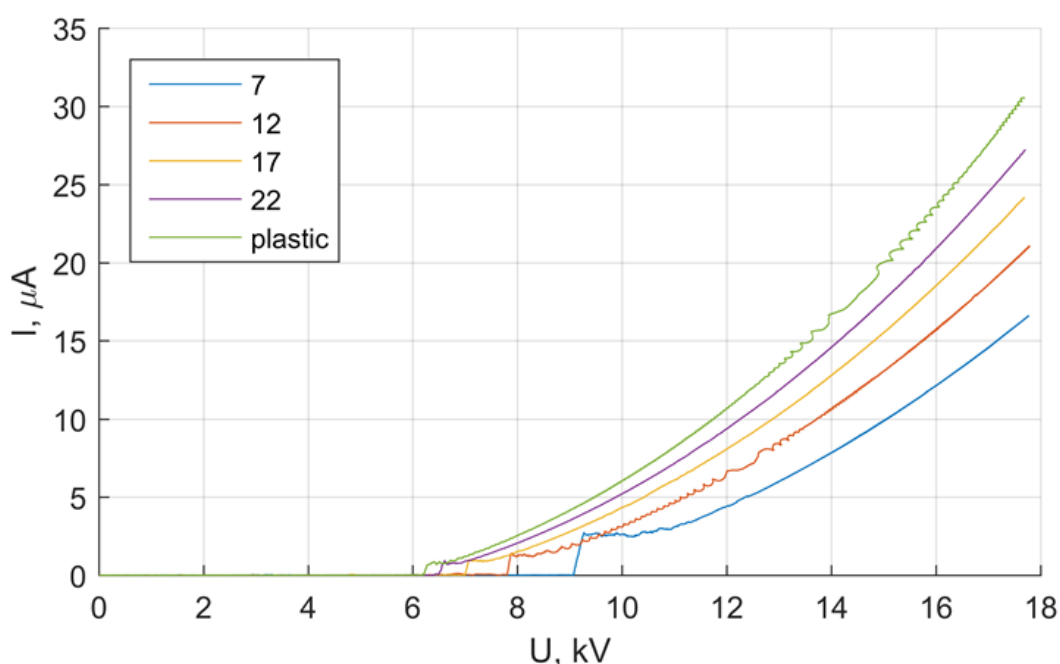


Рис. 21. ДВАХ системы электродов игла плоскость при положительной полярности. Обозначения в легенде – выступ иглы из держателя в мм.

Как можно отметить, металлический объект под высоким потенциалом, расположенный в непосредственной близости с коронирующим электродом, оказывает весьма заметное влияние на его токовые характеристики. Для минимизации этого влияния (приближения ДВАХ к зеленой кривой на рис. 21) решено максимально выдвигать иглы из держателя, обеспечивая при этом их надежное закрепление. Во всех последующих опытах вся система игл выдвинута из держателя на 22 мм.

В ходе проведения опытов дискретно изменялось расстояние между иглами, и также фиксировались динамические вольтамперные характеристики для двух полярностей (рис. 22). Из графиков видно, что при сближении игл суммарный ток системы электродов сначала уменьшается (сравниваются значения при одном

напряжении), а при расстоянии 1 мм снова возрастает. Спадание тока в системе игл и повышение порога зажигания разряда при их сближении объясняется эффектом самогашения, когда разряды от внешних игл зажигаются раньше и искажают электрическое поле у внутренних игл. Однако, при расстоянии 1 мм наблюдаются стримерные процессы (рис. 23), гораздо более интенсивные, чем даже для одиночной иглы при том же напряжении и межэлектродном расстоянии. Детальное исследование данных процессов выходит за рамки данной работы, поэтому останавливаться на них более подробно не станем.

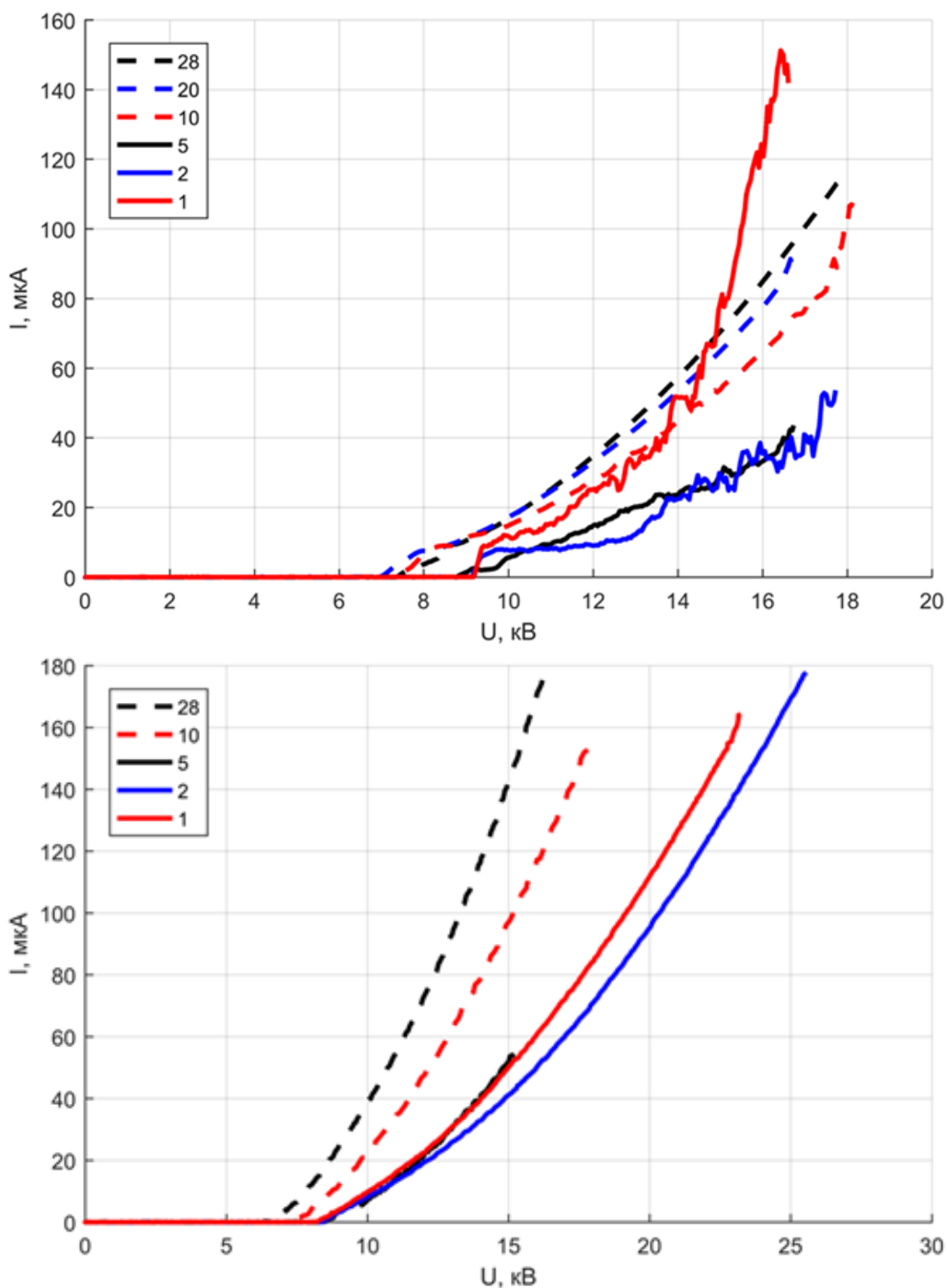


Рис. 22. ДВАХ системы электродов ряд игл – плоскость при различных расстояниях между иглами. Положительная (вверху) и отрицательная (внизу)

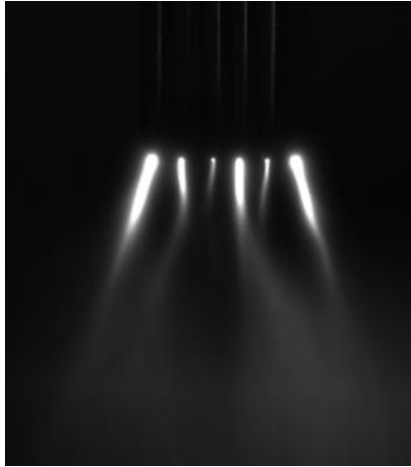


Рис. 23. Фотография коронного разряда системы игл на расстоянии 1 мм.
Положительная полярность, напряжение 15 кВ.

4.2 Зажигание коронного разряда

При изменении расстояния между иглами при значениях менее промежутка электрод - противоэлектрод начинает заметно проявляться эффект взаимного влияния активных высоковольтных электродов, называемый эффектом самогашения. Перераспределение напряженности электрического поля происходит таким образом, что первыми зажигаются разряды на крайних электродах. Последовательность зажигания разрядов в системах игл под влиянием эффекта самогашения достаточно хорошо изучена и освещена [15,17]. Стоит отметить, что в эксперименте при повышении напряжения с помощью светочувствительной камеры фиксировался порядок зажигания коронных разрядов (рис. 24), во всех опытах первыми зажигались разряды на крайних иглах, а поля скоростей фиксировались только при том напряжении, при котором разряды зажигались на всех иглах.

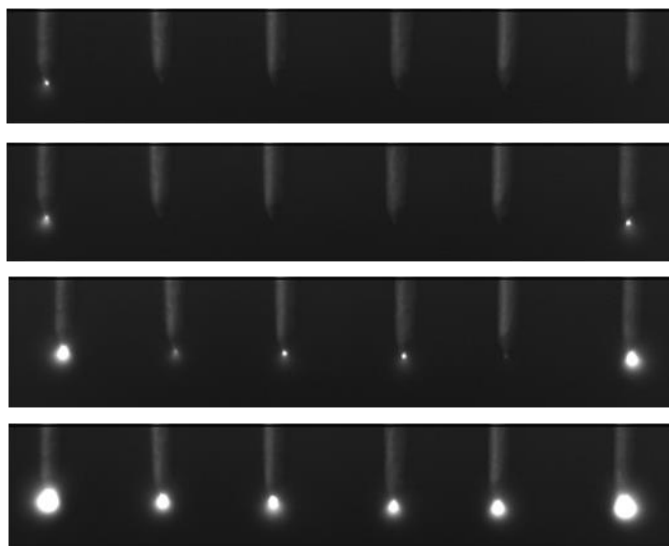


Рис. 24. Фото коронного разряда в системе игл. Отрицательная полярность, расстояние между иглами 5 мм, напряжения сверху вниз – 8, 8.5, 10.3, 14 кВ

4.3 Предварительное моделирование

Перед проведением экспериментов по получению кинематических структур течения электрического ветра в системе электродов ряд игл – плоскость было выполнено упрощенное компьютерное моделирование течения, чтобы оценивать правильность результатов проведения достаточно трудоемкого эксперимента. Для моделирования была использована среда Workbench CFX, использовано наиболее простое приближение, электрический ветер определялся как объемная сила, действующая в области размерами области свечения коронного разряда. Решалась исключительно задача гидродинамики:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f}, \quad \text{уравнение движения}$$
$$\nabla \cdot \vec{v} = 0, \quad \text{уравнение неразрывности}$$

где v – скорость, ν – вязкость, ρ – плотность, p – давление, f – объемная сила.

Для моделирования была построена трехмерная модель, предполагающая «периодическую» постановку задач, т.е. бесконечное число игл на равном расстоянии, а так как в такой постановке пространство будет состоять из повторяющихся и симметричных частей, для решения использована $\frac{1}{4}$ одного периода. Геометрия модели и граничные условия на рис. 25. Значение силы подбиралось до соответствия максимального значения скорости экспериментальному для одиночной иглы с точностью до полпорядка. Свойства материала для воздуха взяты из стандартной библиотеки Air at 25⁰C. Объем воздуха дополнительно разделен на части для построения упорядоченной прямоугольной конечно-элементной сетки. Каждая линия разбивалась минимум на 30 элементов, при этом размер элемента не превосходил 0.5 мм, а в областях большего градиента давления и скорости строилась более мелкая сетка. Такой размер элемента обеспечивал сходимость задачи вплоть до самых малых расстояний между иглами (на рис. 25 красным выделена граница симметрии, соответствующая половине расстояния между иглами), уменьшение размера не изменяло результат решения.

В качестве результата можно рассмотреть контурные графики скорости. При расстояниях между иглами больше 5 мм отчетливо видна структура течения – струя от иглы, направленная к плоскости, скорость в которой практически постоянна, и восходящий поток течения в промежутке между иглами (рис. 26).

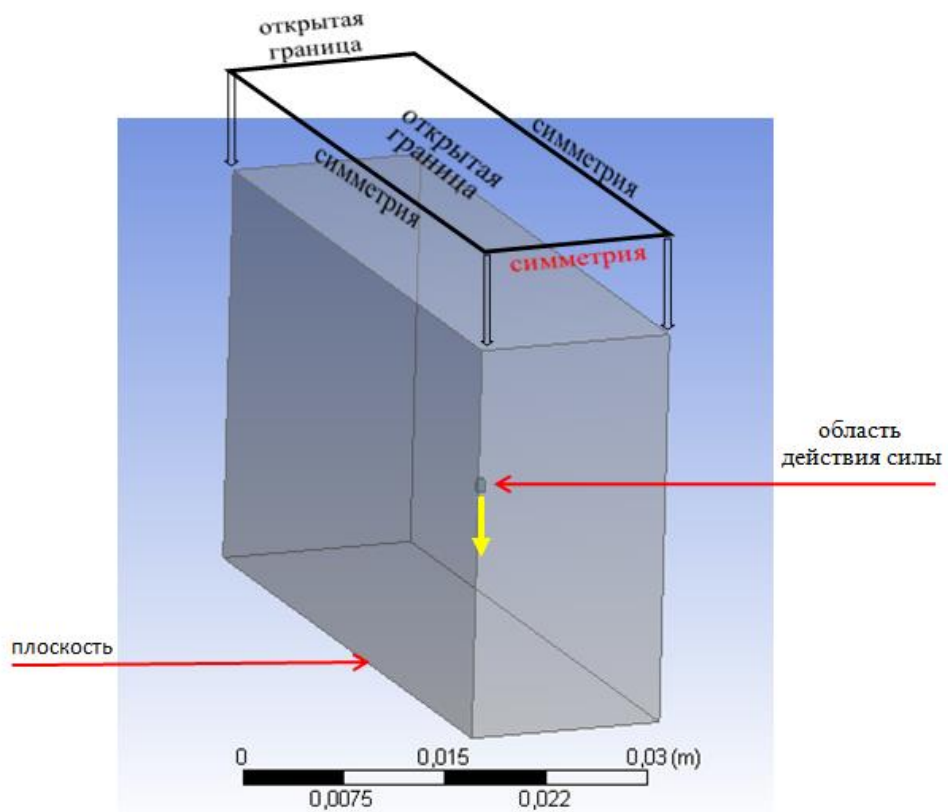


Рис. 25. Геометрия модели в Workbench CFX. Желтой стрелкой показано направление действия силы.

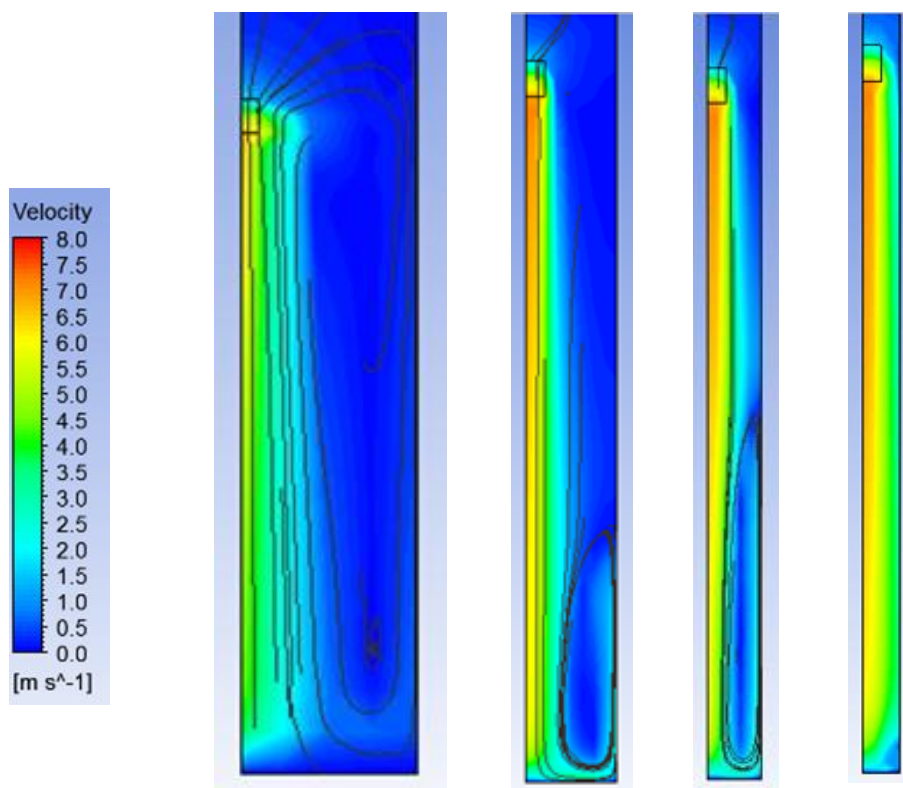


Рис. 26. Модуль скорости и линии тока при расстояниях 10, 5, 3, 2 мм между иглами (слева направо).

Также можно проследить дальнейшее изменение структуры течения в плоскости игл при уменьшении расстояния между иглами (рис. 26). При расстоянии 3 мм между иглами восходящий поток сильно искажает основную струю, сжимая её относительно одной из осей. По линиям тока воздуха можно отметить, что часть восходящего потока увлекается основной струей снова в сторону плоскости, создавая завихрение. Такая ситуация весьма неблагоприятна при охлаждении при помощи электрического ветра, так как завихрение уже нагретого воздуха будет замедлять интенсификацию теплообмена. Иное распределение скорости возникает при уменьшении расстояния до значения менее 2.5 мм, формируется единый поток течения от соседних источников, в интересующей плоскости симметрии нет замкнутых линий тока, а значит, не возникает восходящий поток в промежутке между иглами. Также структуру течения можно пронаблюдать в плоскости симметрии между иглами (рис. 27) и параллельной плоскости, проходящей через иглу (рис. 28), также выведя модуль скорости и линии тока.

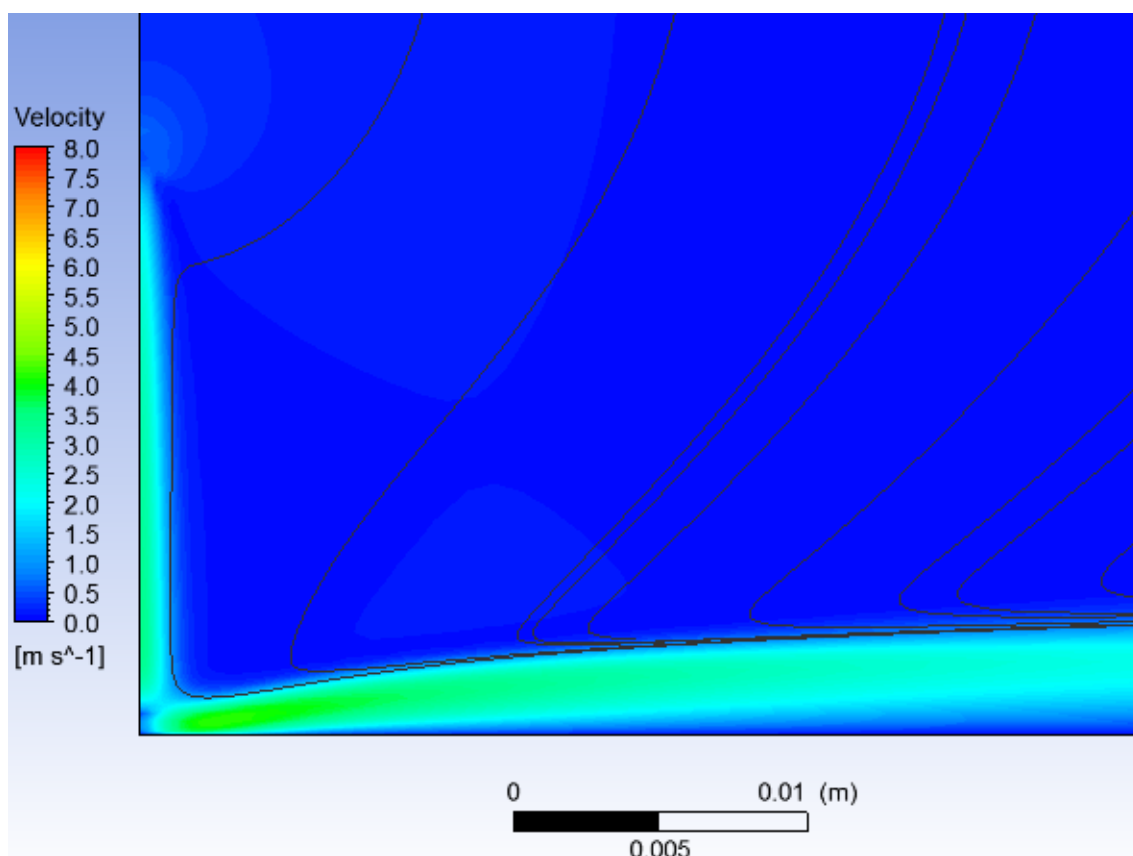


Рис. 27. Скорость и линии тока в плоскости симметрии при расстоянии 2 мм между иглами.

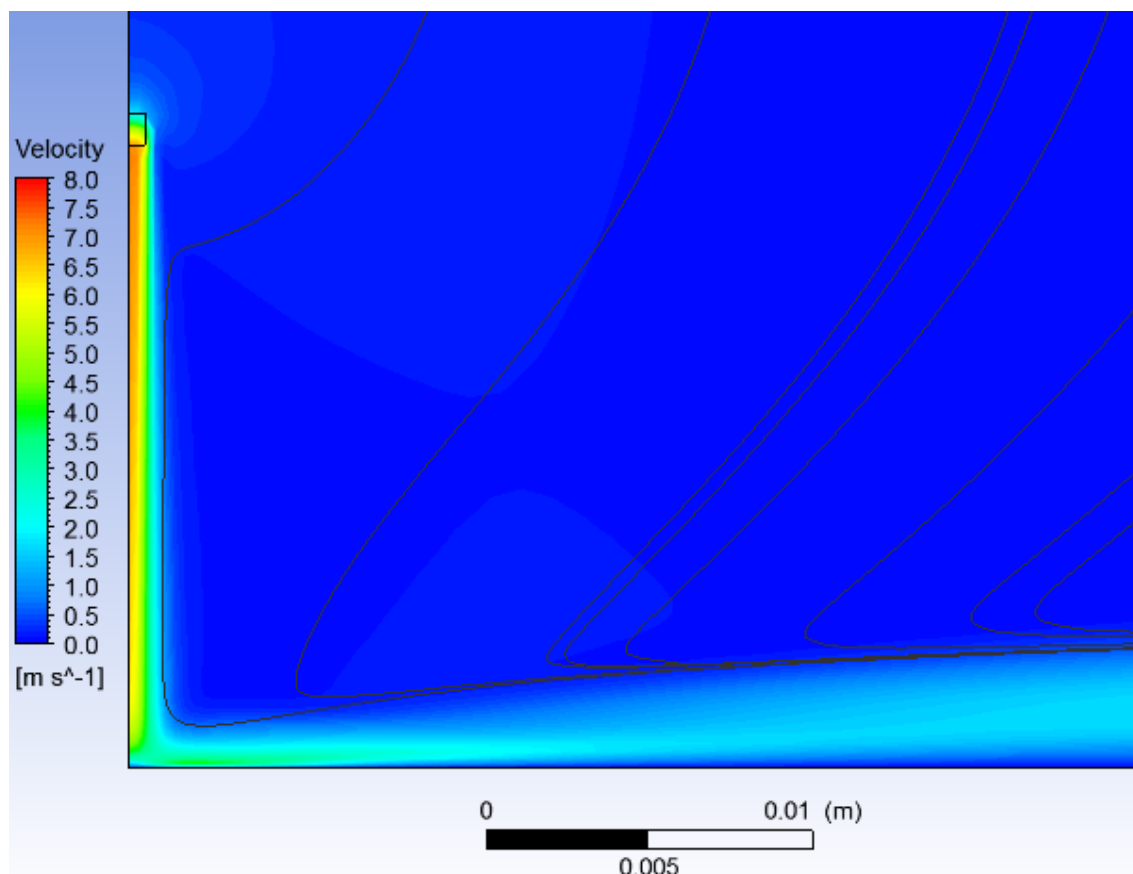


Рис. 28. Скорость и линии тока в плоскости иглы при расстоянии 2 мм между иглами.

Исходя из полученных результатов предварительного моделирования, можно ожидать, что струи течения от отдельных игл образуют единый поток без завихрений между иглами при расстоянии между ними менее 2.5 мм. При этом стоит напомнить, что в моделировании использована «периодическая» постановка задачи, в реальной же системе из всего 6 игл можно ожидать влияние краевых эффектов на все иглы. Для проверки всех предположений необходимо получение кинематических структур течения для различных расстояний между иглами в плоскости всех игл.

4.4 Кинематические структуры

Для анализа кинематических структур течения при различных расстояниях между иглами PIV-методом фиксировалось несколько «окон», которые последовательно склеивались. Далее будут приведены основные результаты данной части экспериментального исследования в следующем формате: каждый рисунок содержит фото коронного разряда, поле скоростей течения и модуль скорости в сечении на полувысоте (10 мм). Профили скорости для наглядности нормированы на максимальное значение. Для представления выбраны данные, соответствующие положительной полярности, так как в этом случае удавалось добиться зажигания разряда даже при малых расстояниях, а течения были более устойчивыми, что объясняется формой коронного разряда (облегающая, а не очаговая). Результаты приведены при последовательном дискретном уменьшении расстояния между иглами от 28 до 1 мм.

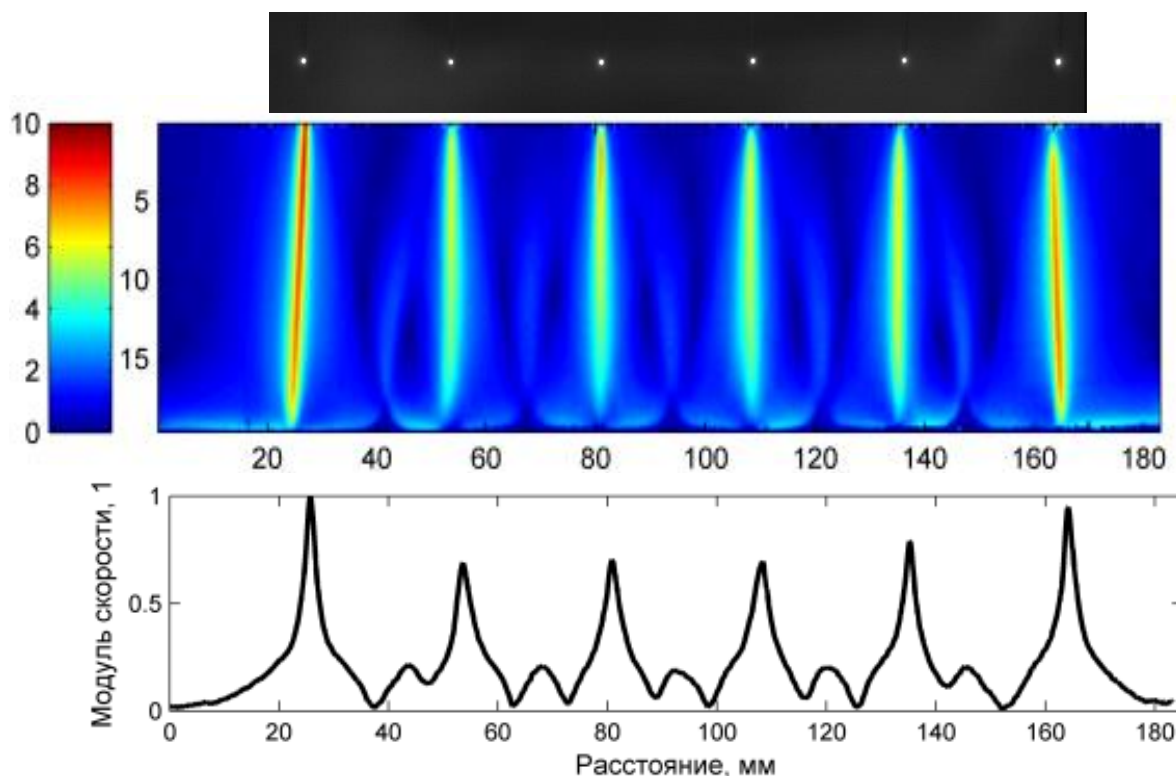


Рис. 29. Фотография коронного разряда и поле скорости.
Расстояние между иглами 28 мм. Напряжение 14,5 кВ

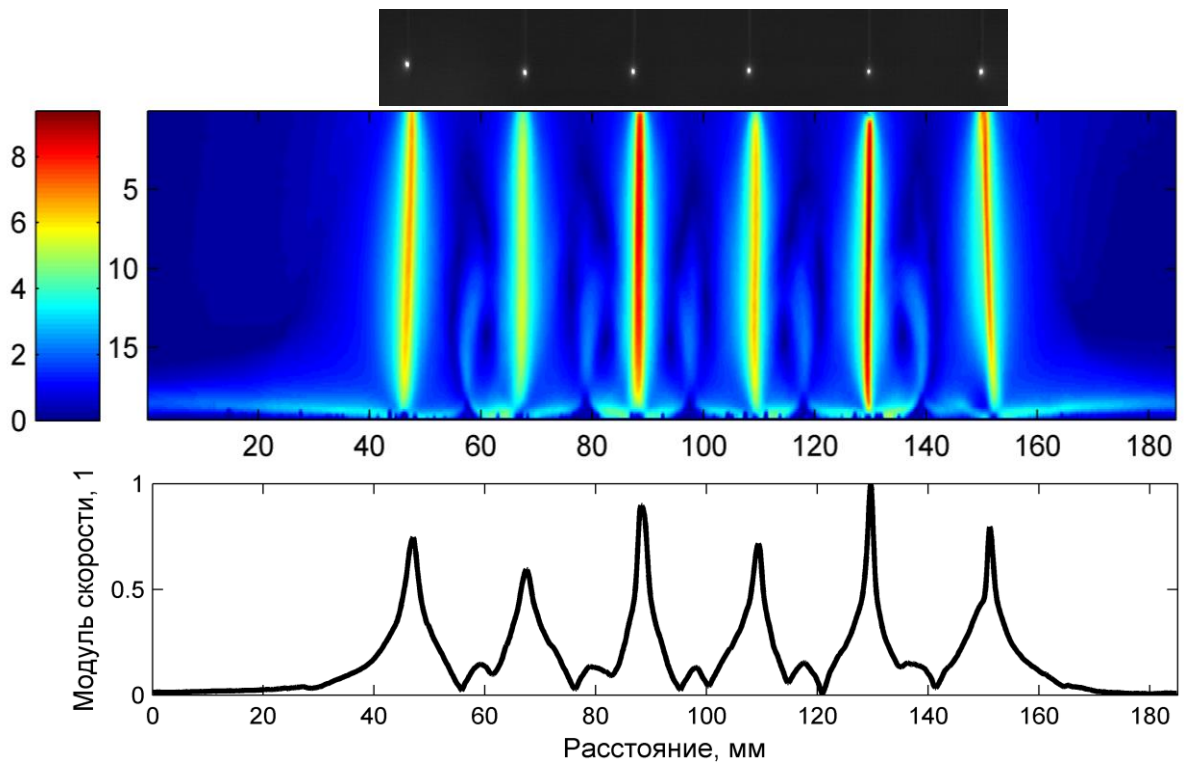


Рис. 30. Фотография коронного разряда и поле скорости.
 Расстояние между иглами 20 мм. Напряжение 15,5 кВ

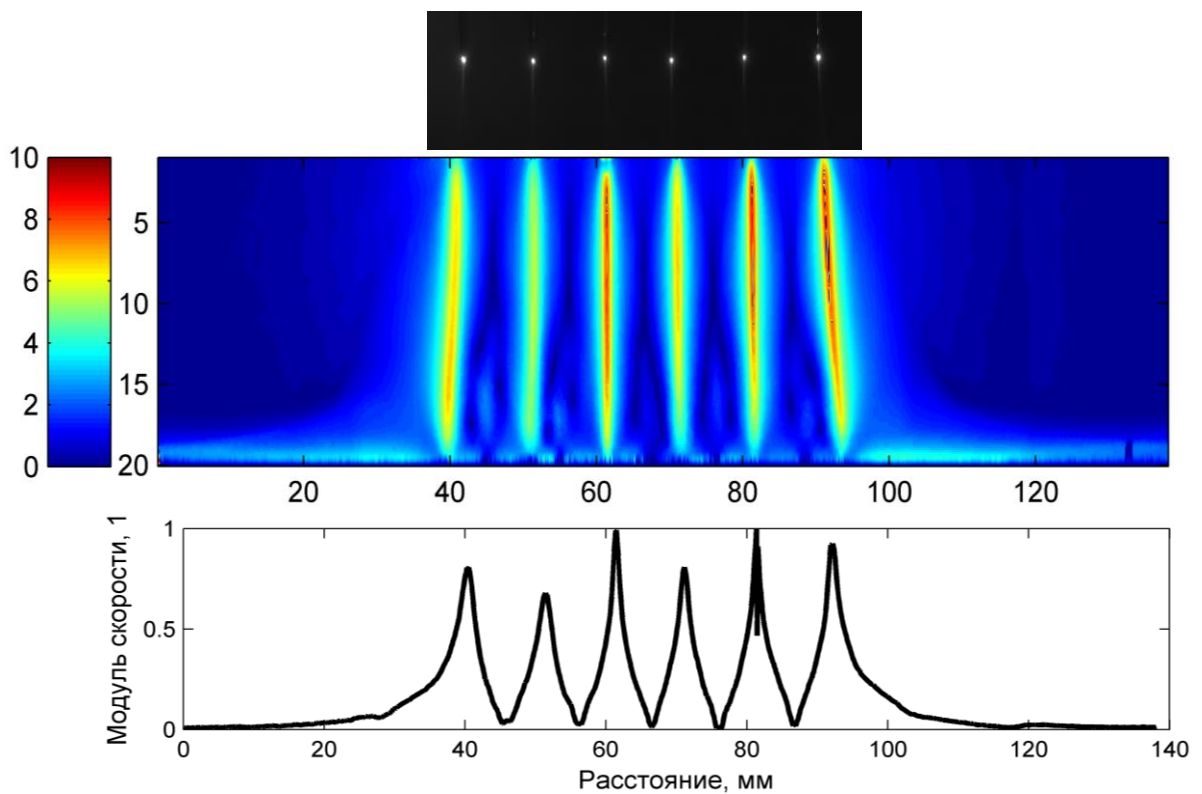


Рис. 31. Фотография коронного разряда и поле скорости.
 Расстояние между иглами 10 мм. Напряжение 15,1 кВ

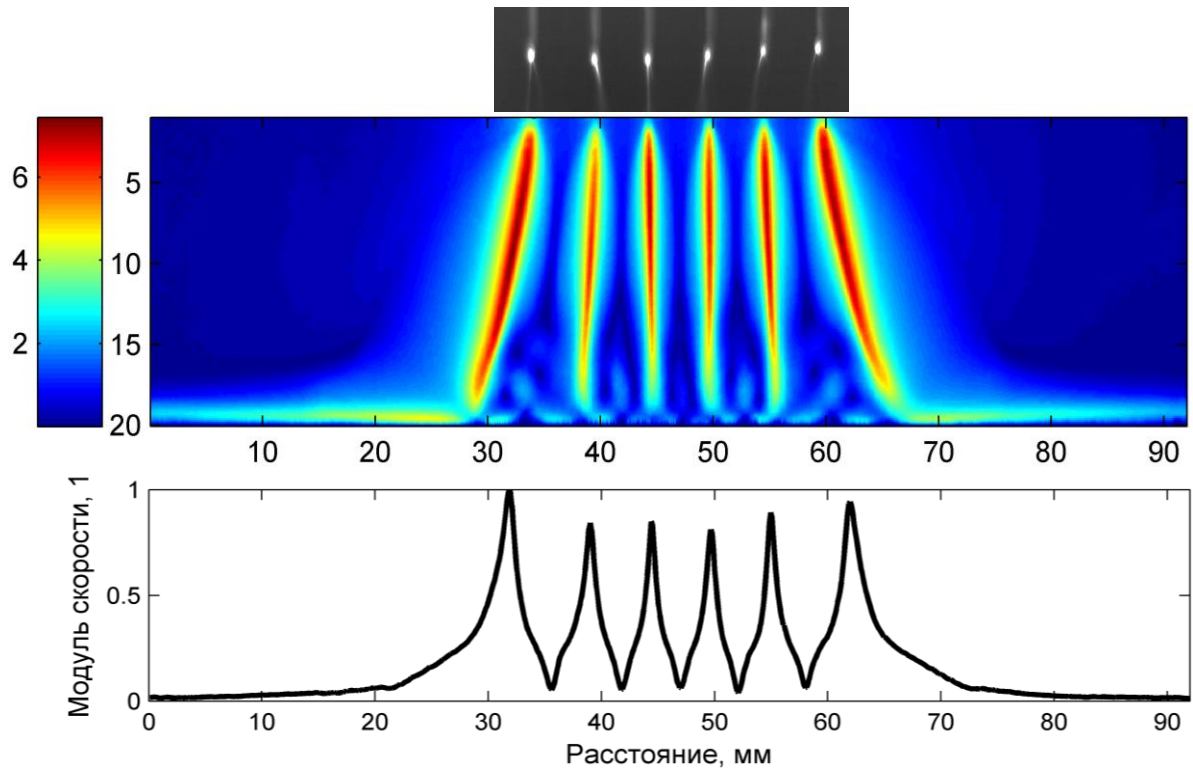


Рис. 32. Фотография коронного разряда и поле скорости.
 Расстояние между иглами 5 мм. Напряжение 15,6 кВ

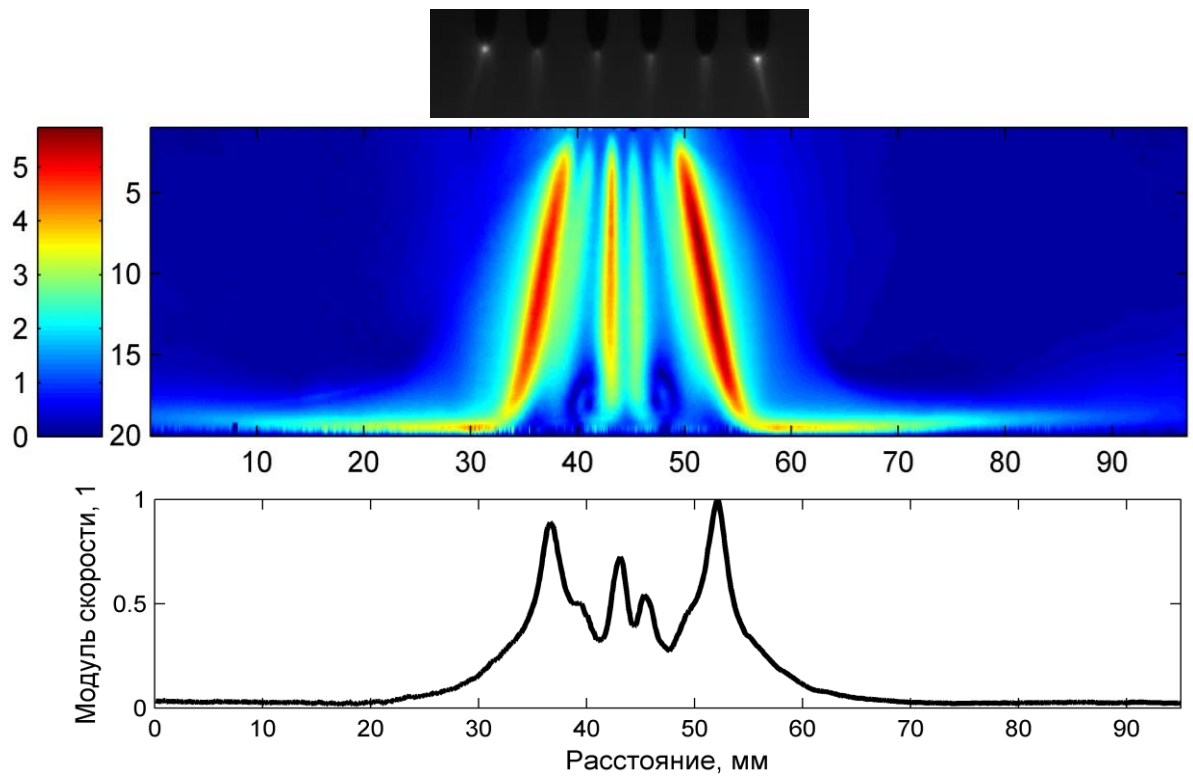


Рис. 33. Фотография коронного разряда и поле скорости.
 Расстояние между иглами 2 мм. Напряжение 14,5 кВ

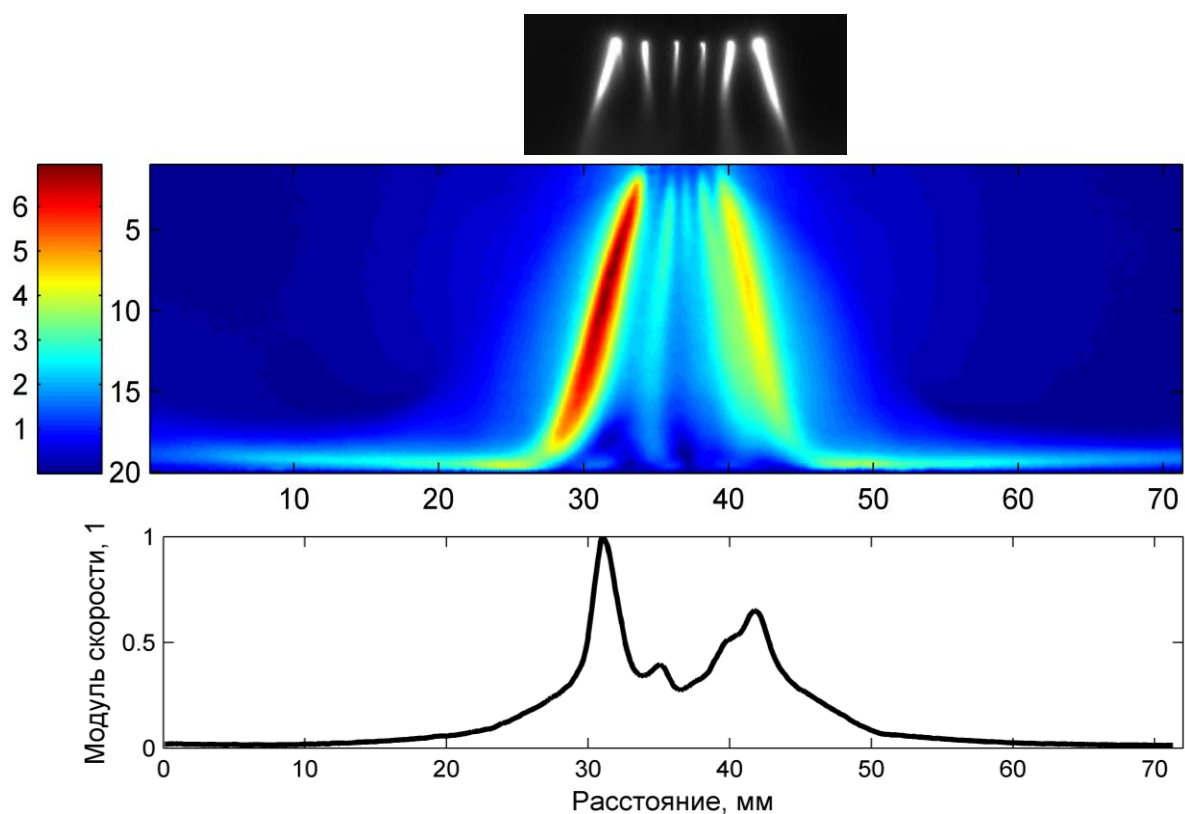


Рис. 34. Фотография коронного разряда и поле скорости.
 Расстояние между иглами 1 мм. Напряжение 14,5 кВ

На графиках на рис. 29-34 можно проследить, как эволюционирует течение с уменьшением расстояния между активными электродами – иглами. При больших расстояниях (10, 20, 28 мм) в структуре течения отчетливо видны отдельные струи от каждой иглы, расходящиеся потоки после столкновения этих струй с пластиной и восходящие потоки течения в промежутках между иглами. При наибольшем отдалении игл (28 мм) струю течения от каждой отдельной иглы можно считать практически эквивалентной струе от одиночной иглы. При уменьшении расстояния потоки от крайних игл отклоняются во внешнюю область, также восходящие потоки искажают основные струи в области пластины (рис. 32; 5 мм). Когда расстояние между иглами становится меньше межэлектродного промежутка (20 мм), проявляются эффекты самогашения, коронные разряды на электродах зажигаются не одновременно, и интенсивность свечения разрядов различается, что можно считать косвенным свидетельством отличия токов, протекающих через разные иглы. Так как множество литературных источников подтверждают линейную зависимость скорости центральной струи электрического ветра от квадратного корня тока, отличие скоростей струй от разных игл также можно считать подтверждением различия токов. Более того, можно соотнести заметные различия интенсивности свечения разрядов со скоростями центральных струй от различных игл (отчетливо для крайних игл на рис. 33).

При расстоянии 2 мм между иглами можно отметить отсутствие восходящего потока между двумя центральными иглами, что говорит об объединении струй от этих игл в единый поток. Для подтверждения этого были получены поля скоростей в поперечном сечении (рис. 35). Течение в промежутке между иглами повторяет течение в сечении иглы, отличаясь лишь по значениям скорости. При отрицательной полярности (которой соответствует очаговая форма коронного разряда) эффекты самогашения проявляются сильнее, например, при малых расстояниях добиться зажигания разряда на всех иглах не удавалось, при повышении напряжения только росла интенсивность разряда на крайних электродах (рис. 37).

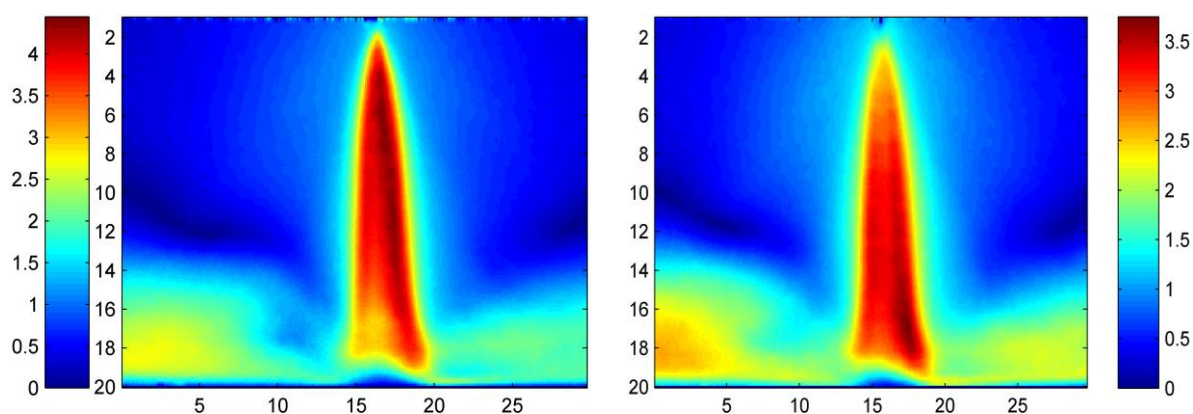


Рис. 35. Поле скорости в сечении одной из центральных игл (слева) и в сечении между центральными иглами (справа). Расстояние между иглами 2 мм. Напряжение 14,5 кВ

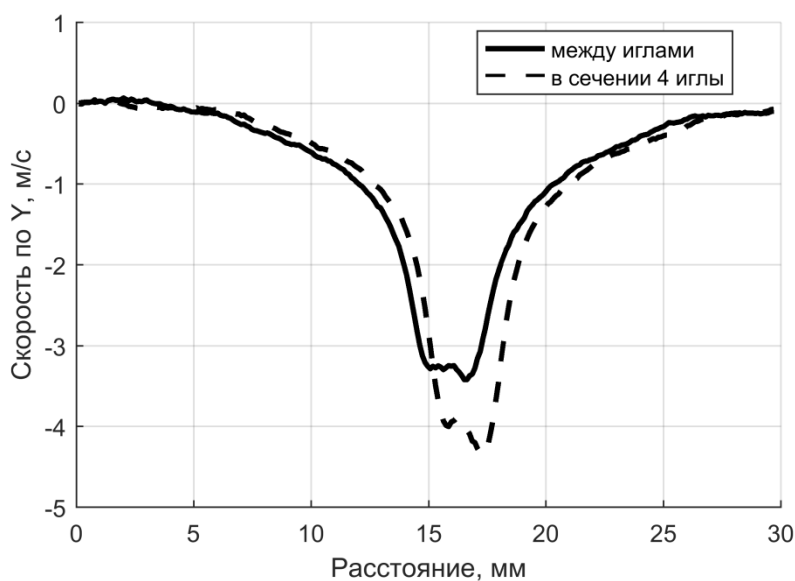


Рис. 36. Y-компонента скорости в сечении иглы и между центральными иглами. Расстояние между иглами 2 мм. Напряжение 14,5 кВ

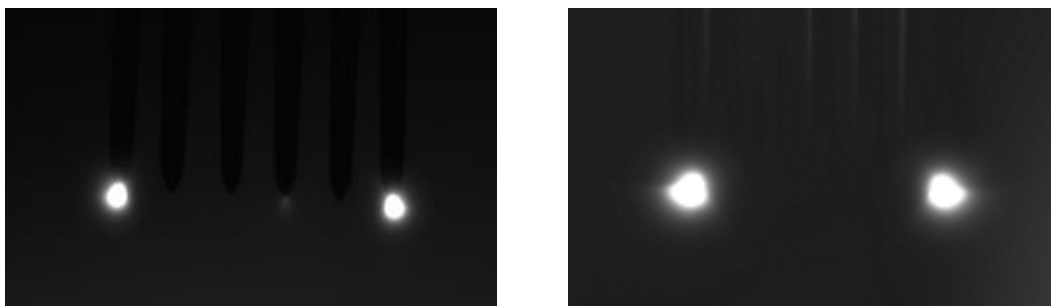


Рис. 37. Фото коронного разряда при отрицательной полярности. Слева – расстояние между иглами 2 мм, напряжение 18 кВ. Справа – между иглами 1 мм, напряжение 20 кВ.

Таким образом, при изменении расстояния между иглами кинематические структуры течений могут значительно различаться. При расстоянии более межэлектродного промежутка можно отметить выделенную струю от каждой иглы, и восходящие потоки между иглами. При малом расстоянии удалось добиться возникновения единого потока воздуха от нескольких игольчатых электродов.

4.5 Охлаждение пластины

Метод получения результатов по охлаждению уже был описан выше, поэтому представляется возможным привести сразу результат проведения нескольких серий экспериментов. Для каждой полярности и расстояния между игольчатыми электродами проводилось несколько опытов по определению мощности нагревателя в присутствии и отсутствие электрического ветра. Результаты приведем отдельно для каждой полярности:

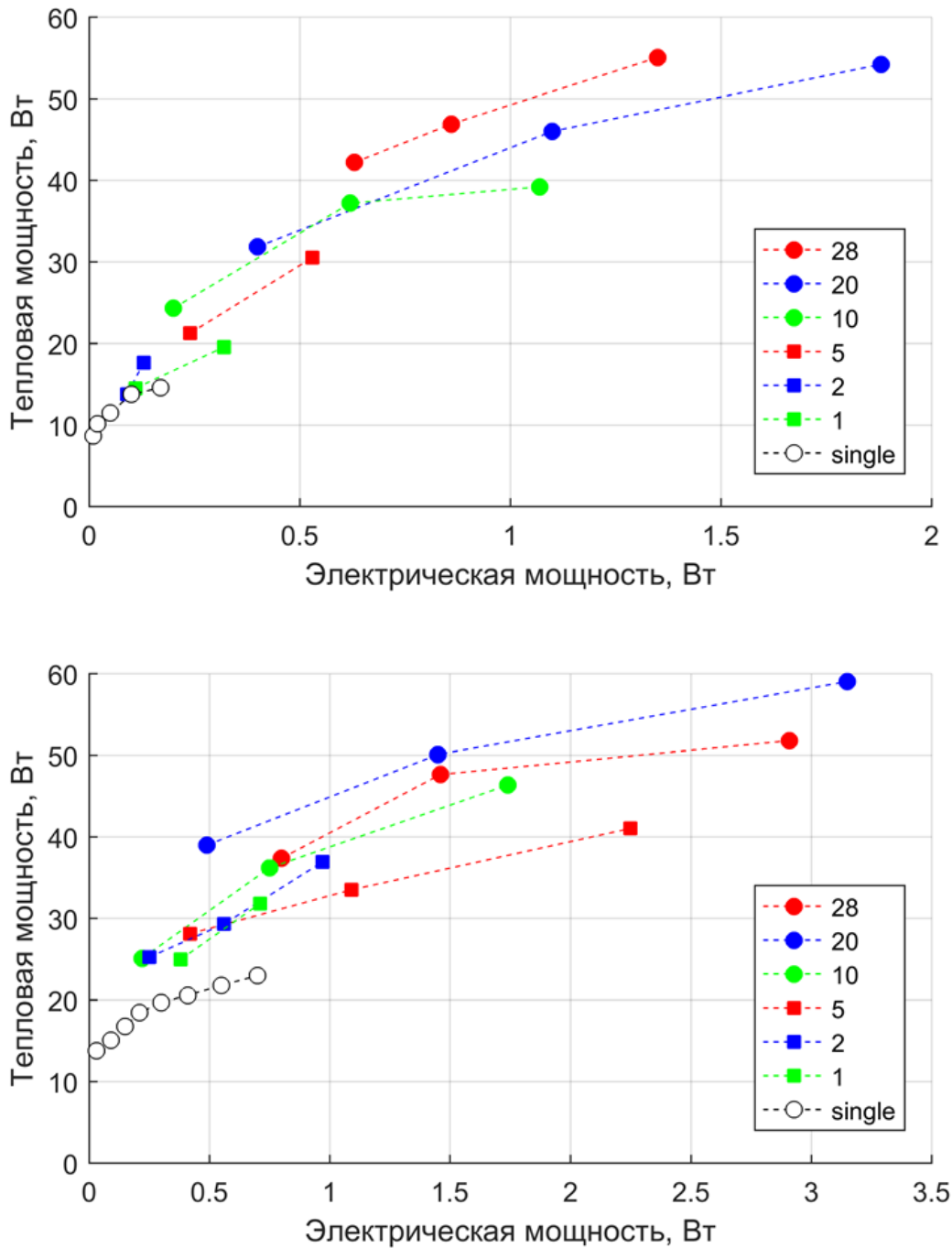


Рис. 38. Отводимая от нагревателя мощность. Положительная (вверху) и отрицательная (внизу) полярность. Обозначения в легенде – расстояние между иглами в мм.

Дополнительно на оба графика нанесены аналогичные зависимости для одиночной иглы, полученные в работе [2]. Из общего вида зависимостей можно сделать вывод о том, что использование многоэлектродной системы повышает эффективность охлаждения по сравнению с одиночным электродом того же типа. Более явное различие наблюдается на графике для отрицательной полярности: для всех расстояний между иглами отводимая тепловая мощность выше, чем для одиночной иглы, при одном и том же значении затрачиваемой мощности. Наиболее принципиальным отличием многоэлектродной системы является возможность повышения прикладываемой мощности. Так как исследуемая система является высоковольтной, логичным ограничением на повышение напряжения является значение напряжения пробоя. Поэтому использование системы нескольких игольчатых электродов позволяет вкладывать большую электрическую мощность, что приводит к увеличению и отводимой тепловой мощности. Например, для данной системы из 6 игл удалось эффективно отвести от нагревателя 60 Вт тепловой мощности (для расстояния между иглами 28 мм, отрицательной полярности), что более чем вдвое превосходит максимальное значение для одиночной иглы при том же межэлектродном расстоянии – 23 Вт, и значительно превышает мощность, отводимую естественной конвекцией от горизонтального нагревателя – 5 Вт. Наибольшая эффективность охлаждения, согласно полученным результатам, достижима при увеличении расстояния между игольчатыми электродами. Косвенное объяснение такому результату можно найти в распределениях температуры по поверхности нагревателя (Рис. 39-40). Можно также предположить, что именно изменение кинематики течения воздуха вызывает увеличение отводимой тепловой мощности при увеличении расстояния между иглами. При малых расстояниях между иглами скорости воздушных потоков меньше, между струями возникают также медленные завихрения, препятствующие интенсификации теплообмена. При увеличении расстояния между игольчатыми электродами, скорости основных струй течения увеличиваются, между основными струями существуют стабильные восходящие потоки, видимо, улучшающие отвод тепла и движение уже нагретого воздуха.

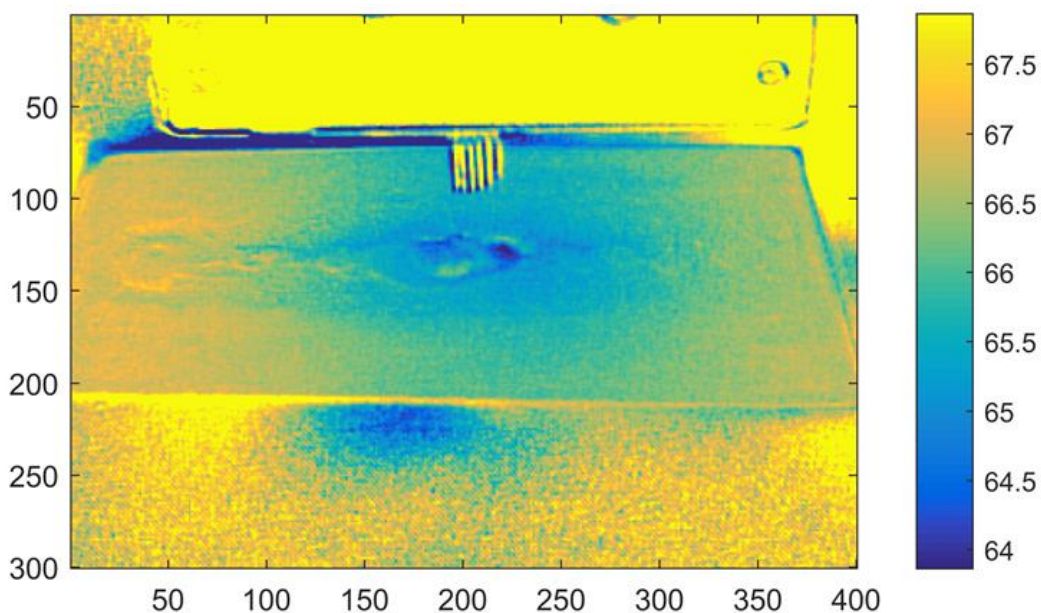


Рис. 39. Температура пластины при охлаждении. Расстояние между иглами 2 мм.

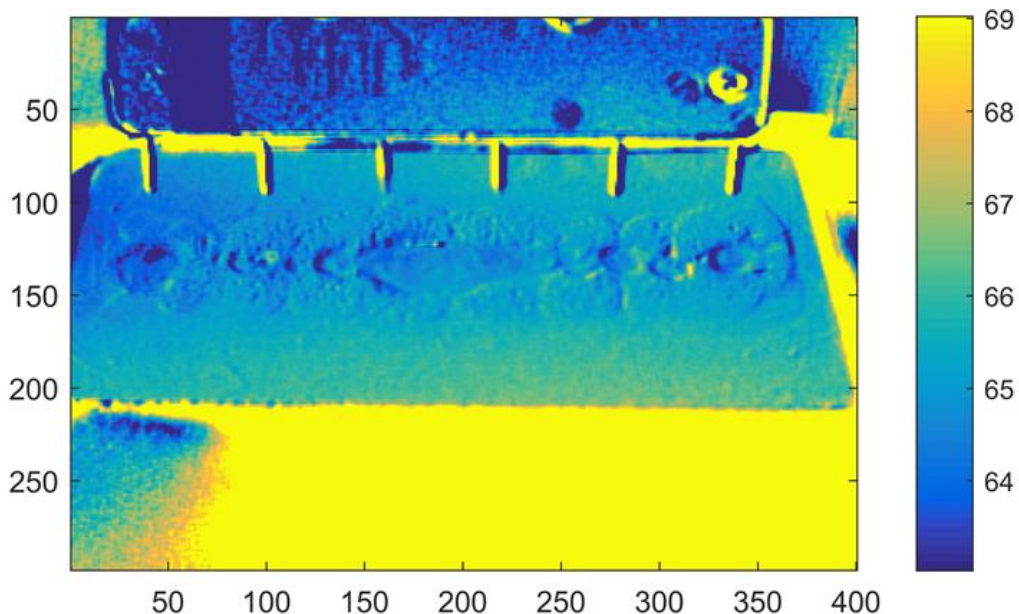


Рис. 40. Температура пластины при охлаждении. Расстояние между иглами 28 мм.

Качественным отличием двух распределений температуры является градиент по поверхности. При малом расстоянии между иглами максимально охлаждается центральная область, при этом градиент температуры достигает 3 К, аналогичная ситуация наблюдалась при использовании для охлаждения одиночной иглы. Принципиально другой результат можно отметить при увеличении расстояния между иглами (Рис.40): отдельные потоки от разных игл приводят к тому, что вся поверхность пластины интегрально охлаждается, формируя почти равномерное распределение температуры, градиент по поверхности не превышает 1 К.

Можно также сравнить эффективность охлаждения от трех различных систем электродов:

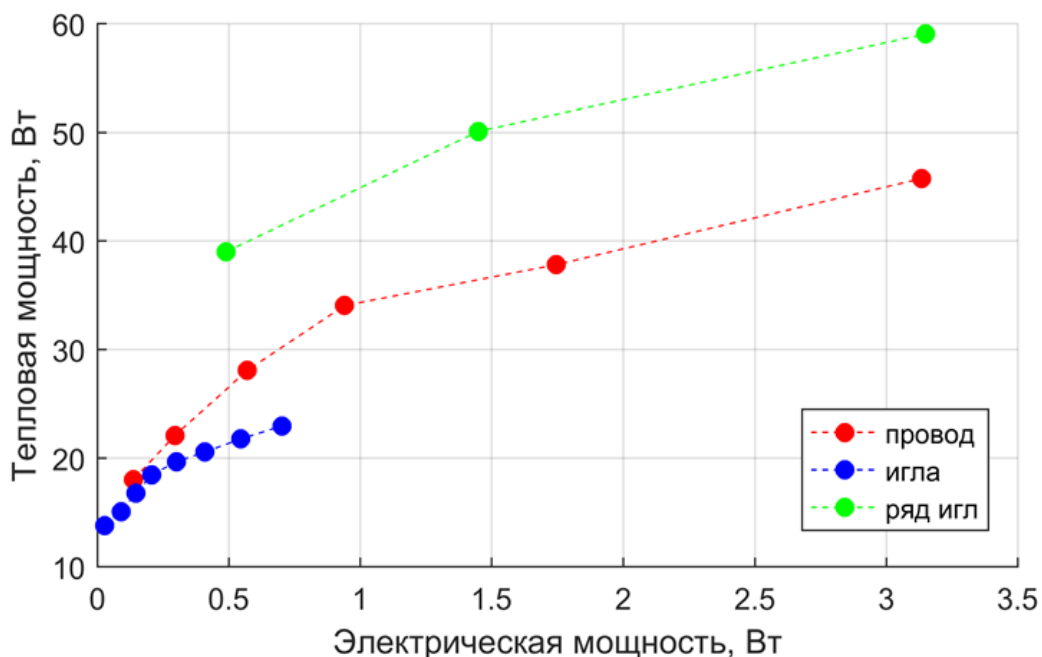


Рис. 41. Отводимая от нагревателя мощность для различных активных электродов.

На рис. 41 для представления выбраны данные, соответствующие отрицательной полярности для систем электродов провод - плоскость, игла - плоскость [2], ряд игл - плоскость. Из полученных для провода в работе [1] данных использовано наиболее подходящее межэлектродное расстояние 15 мм, для ряда игл выбрано наиболее эффективное расстояние между иглами 20 мм. Можно отметить значительное увеличение эффективности охлаждения при использовании системы игольчатых электродов.

Заключение

В ходе проведения данной работы освоено несколько техник получения и обработки экспериментальных данных, создано несколько скриптов в среде MATLAB, которые значительно упростят обработку подобных экспериментальных данных в будущем. В процессе проведения опытов получены динамические вольтамперные характеристики при уменьшении расстояния между игольчатыми электродами, в результате получены данные, которые демонстрируют влияние эффекта самогашения. Наиболее показательными результатами можно назвать кинематические структуры течения воздуха. Согласно полученным данным, при расстояниях между иглами порядка межэлектродного промежутка наблюдается устойчивая структура течения: отдельные струи от каждой иглы и восходящие потоки в промежутках между иглами. Такой тип течения позволяет эффективно отводить теплоту от нагревателя. При уменьшении расстояния между иглами до 2 мм возможно возникновение единого потока течения от нескольких игл, однако в таком случае скорости возникающего потока слишком малы для значительного увеличения теплоотвода. Сравнивая значения отводимой тепловой мощности, можно определить, что добавление в высоковольтную систему дополнительных игл увеличивает эффективность охлаждения. Эффективность охлаждения системой из игольчатых электродов растет с увеличением расстояния между иглами. Сравнивая эффективность охлаждения одного и того же нагревателя при помощи трех различных систем электродов, можно отметить значительное увеличение эффективности охлаждения при использовании системы игольчатых электродов. К сожалению, такая система имеет большое количество варьируемых параметров, поэтому её полномасштабное исследование представляется более глобальной задачей. Тем не менее, в рамках данной работы для электрического ветра в системе электродов ряд игл – плоскость получен ряд экспериментальных выводов по кинематике течения воздуха и охлаждению протяженного нагревателя. Кроме того, получена обширная база экспериментальных данных, которая может быть использована для верификации различных компьютерных моделей, описывающих явление электрического ветра.

Список литературы

1. Яковлев В.В. Экспериментальное исследование эффективности охлаждения протяженного нагревателя электрическим ветром. Бакалаврская работа. СПб, 2015
2. Бегаль Д.И. Экспериментальное исследование эффективности охлаждения пластины электрическим ветром. Курсовая работа. СПб, 2016
3. И. П. Верещагин. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии. М. Энергоатомиздат, 1985.
4. Bologa M.K., Grosu F.P. Enhancement of heat and mass transfer by an electric field // Surf. Eng. Appl. Elect. 2012. Vol. 48. N 5. P. 456–464.
5. Корчемкин И.Н., Стишков Ю.К. // Proc. of the 5th International conference on materials science and condensed matter physics and of Symposium "Electrical methods of materials treatment". Chisinau, Moldova, 2010. P. 266.
6. Самусенко А.В., Стишков Ю.К. Электрофизические процессы в газах при воздействии сильных электрических полей. Уч.-метод. пособие. СПб.: ВВМ, 2012. 649 с.
7. Wang H.-C., Jewell-Larsen N.E., Mamishev A.V. Thermal management of microelectronics with electrostatic fluid accelerators // Appl. Therm. Eng. 2013. Vol. 20. N 1–2. P. 190–211.
8. Jewell-Larsen N.E., Ran H., Zhang Y., Schwiebert M.K., Honer K.A. Electrohydrodynamic (ehd) cooled laptop // Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. 2009. P. 261-266.
9. Chen I.Y., Guo M.-Z., Yang K.-S., Wang C.-C. Enhanced cooling for LED lighting using ionic wind // Int. J. Heat and Mass Tran. 2013. Vol. 57. N 1. P. 285–291.
10. I. A. Elagin, D. I. Begal', I. A. Ashikhmin, and Yu. K. Stishkov. Change in the Direction of Electric Wind from a Wire Electrode Tilted Relative to a Grounded Plane. Technical Physics Letters, 2017, Vol. 43, No. 1, pp. 53–55.
11. A. Samusenko, Y. Stishkov, P. Zhidkova "Computer simulation of ionic wind in the point-torus electrodes system", Intern. Journal of Plasma Environmental Science and Technology, vol. 9 (1), 2015, pp. 24-28.
12. Adamiak K. Numerical models in simulating wire-plate electrostatic precipitators: A review // J. Electrostat. 2013. Vol. 71. N 4. P. 673–680.

13. Елагин И.А., Стишков Ю.К. Моделирование нестационарных электрогидродинамических течений в симметричной системе электродов типа провод-провод // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 9. С. 15–19.
14. I.A. Elagin, I.A. Ashikhmin, A.V.Samusenko, Y.K. Stishkov, V.V. Yakovlev. Computer Simulation of Plate Cooling by Ionic Wind from the Wire Electrode and its Experimental Verification 2016 IEEE International conference on dielectrics (ICD), vols 1-2, pp 151-154, 2016
15. Киладзе И.Е. Экспериментальное исследование интенсификации теплообмена электрическим ветром. Бакалаврская работа. СПб, 2011
16. Соколов А.И. Исследование подъемной силы электрического ветра в воздухе. Магистерская работа. СПб, 2013
17. Кирпиченко Д.И. Оптимизация многоэлектродной системы для повышения эффективности электрического ветра. Курсовая работа. СПб, 2011
18. Ren-Tsung Huang, Wen-Jenn Sheu, Chi-Chuan Wang. Heat transfer enhancement by needle-arrayed electrodes. 2009, Energy Conversion and Management.
19. Hamdi M. и др. Comparison of different tracers for PIV measurements in EHD airflow // Exp. Fluids. 2014. Т. 55. № 4. С. 1702.
20. Kriegseis J, Schwarz C, Duchmann A, Grundmann S, Tropea C (2012) PIV-based estimation of DBD plasma-actuator force terms // AIAA paper 2012-0411.