

УДК 621.3.015.333, 57.085.23, 577.352
EDN: EYGMQO

PACS: 47.65.-d

Исследование эффективности канальной системы охлаждения воздуха с использованием электрогидродинамических потоков© В. В. Воеводин^{1,2,*}, Я. Е. Жарков¹, А. С. Кириллов¹, О. И. Коржова¹, С. И. Мошкунов¹,
В. Ю. Хомич¹¹ Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, 191181 Россия

* E-mail: vvvoevodin@ieeras.ru

² Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск, 630090 РоссияСтатья поступила в редакцию 6.11.2025; после доработки 19.11.2025; принята к публикации 11.12.2025
Шифр научной специальности: 2.4.3

Проведено расчетно-экспериментальное исследование модельной канальной системы охлаждения с использованием принудительной конвекции воздуха и вспомогательных электрогидродинамических (ЭГД) потоков, создаваемых коронным разрядом, при варьировании геометрических параметров канала и мощности устройств для создания охлаждающих потоков. Для рассматриваемых условий показана область эффективного использования ЭГД-потоков и выявлена нелинейная зависимость температуры стенок канала от мощности создающего ЭГД-поток коронного разряда.

Ключевые слова: электрогидродинамика (ЭГД); электрический ветер; плазменный турбулизатор; канальные системы охлаждения.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-69-74

Введение

Современная тенденция развития электротехники характеризуется неуклонным ростом быстродействия электронных компонентов при их постоянной миниатюризации. Это закономерно приводит к значительному увеличению плотности тепловыделения с поверхности активных элементов. Для отвода тепла на сегодняшний день применяется широкий спектр систем охлаждения (СО): основанных на калориметрическом и термоэлектрическом эффектах, применяющих тепло-массоперенос на основе электрогидродинамического (ЭГД) потока, жидкостных и т. д. [1, 2]. Характерным случаем для многих СО с принудительной конвекцией является использование каналов, через которые прокачивается охлаждающий газ. С целью управления потоком в канале и создания перемешивающих возмущений для интенсификации теплообмена на нагреваемых поверхностях с газом мо-

гут применяться специальные вставки в поток [3], которые при этом создают дополнительное аэродинамическое сопротивление. В последние годы интерес исследователей направлен к возможности использования в качестве генератора вторичного потока так называемого «электрического ветра» или электрогидродинамического потока [4–6]. ЭГД-поток создается в газовом разряде, и вызывается соударением образованных заряженных частиц с молекулами газа в сильном электрическом поле. К числу преимуществ его использования относятся отсутствие движущихся механических частей, относительно низкое аэродинамическое сопротивление создающих разряд электродов, а также возможность создания распределенных систем охлаждения с электродами произвольной формы, которые могут быть интегрированы в труднодоступные зоны СО. Перспективность их применения в СО была неоднократно продемонстрирована как экспериментально на открытом

воздухе [7], так и с помощью моделирования в каналах различной формы [8, 9]. В то же время, экспериментальных данных о работе подобной комбинированной СО в известной литературе мало.

Целью данной работы являлось экспериментальное проведение исследований эффективности охлаждения теплонагруженных элементов в канале как самостоятельным ЭГД-поток, создаваемым коронным разрядом (КР), так и совместно с принудительной конвекцией, создаваемой вентилятором.

Описание установки

В качестве модельной СО была использована конструкция (рис. 1), представлявшая собой горизонтальный сборный канал из пластика ABS. Размеры конструкции составляли $115 \times 55 \times 2d$ мм³, где d – расстояние от пластин до точек крепления электродов для создания ЭГД-потоков. Принудительная конвекция в канале создавалась центробежным вентилятором через спроектированный ламинаризатор с регулируемой мощностью (0,3–1,2 Вт: 1–3 м/с в канале, расход газа $m = 0–2$ г/с). В качестве внутренних стенок канала использовались заземлённые теплоизолированные пластины из полированного алюминия. Нагрев пластин осуществлялся с торцов при помощи плёночных керамических резисторов, мощность нагрева варьировалась в диапазоне от 10 до 30 Вт. Для контроля температуры пластин использовались термопары типа К, закреплённые в их центре, подключаемые к прибору CENTER 303 (погрешность $\pm 0,7$ °С).

Для создания ЭГД-потока посередине канала были натянуты поперечно медные проволоки диаметром 50 мкм, подключённые к источнику стабилизированного высокого постоянного напряжения отрицательной полярности Spellman SL20*2000, ток в его цепи измерялся мультиметром Fluke 17B+, что позволяло оценить среднюю мощность КР $P_{кор}$. Расстояния проволоки-пластина (d) и проволока-проволока (L) могло варьироваться в диапазоне 6–10 мм.

Питание вентилятора и нагревательных резисторов осуществлялось с помощью стабилизированных регулируемых источников постоянного напряжения, мощность нагрева подбиралась для поддержания температуры пластин $T_0 = 100$ °С по их центру в условиях естественной конвекции без ЭГД-потока. Температура нагнетаемого в канал воздуха составляла 22 °С, влажность 40 %.

В рамках экспериментов регистрировался перепад относительно установившихся значений температуры $\Delta T_{кор} = T_{вент} - T_{комб}$, определяемый как разница между температурой пластин при принудительной конвекции $T_{вент}$ и при ее комбинации с ЭГД-потоком $T_{комб}$. Регистрация проводилась при различных сочетаниях мощности коронного разряда $P_{кор}$ и расхода m вентилятора, а также различной ширине канала d . Для определения эффективности применения ЭГД потока рассчитывалось отношение перепада температур к потребляемой КР электрической мощности $\Delta T_{кор}/P_{кор}$.

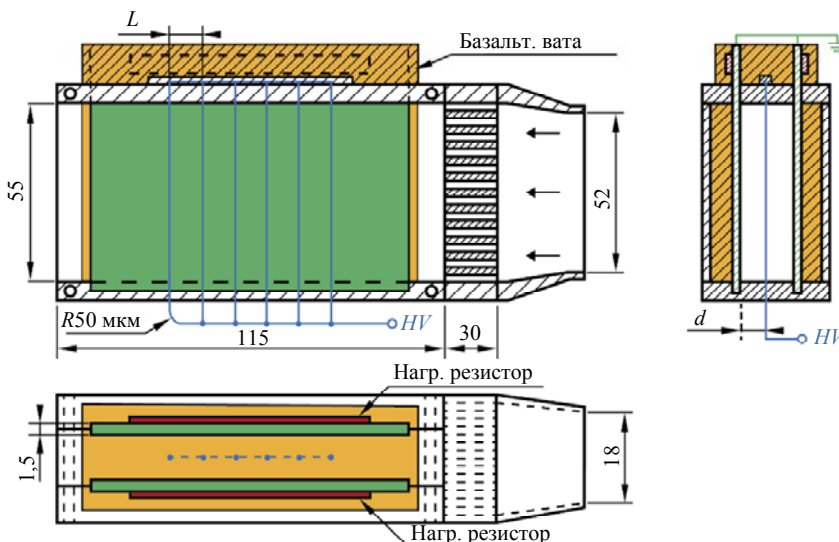


Рис. 1. Схема экспериментального канала охлаждения с принудительной конвекцией и возможностью создания ЭГД-потоков (красным обозначены нагревательные резисторы, зеленым – пластины-аноды, синим – проволоки-катоды)

Математическая модель и результаты расчетов

С целью объяснения получаемых результатов в пакете программ для численного моделирования методом конечных элементов была разработана модель канала с аналогичной используемой в эксперименте геометрией. Модель реализует итерационный сопряжённый расчёт КР и теплогидродинамического поля в воздухе. На каждой итерации сначала решается задача газодинамики в приближении RANS с моделью турбулентности $k-\omega$ [10] и учётом конвективного теплообмена между твёрдыми и газовыми областями; затем на основе полученного поля температуры и скорости рассчитывается распределение электрического потенциала (уравнение Пуассона) и плотности пространственного заряда (уравнение конвекции-диффузии для одного типа носителей). Инжекция заряда на поверхности проводников активируется при превышении локальной напряжённости поля над порогом зажигания, определяемым по формуле Пика [11], и реализуется через слабую форму граничного условия. Для стабилизации итерационного процесса превышение поля фильтруется по аналогии с RC-цепочкой, что подавляет осцилляции при переходе через порог. Полученное распределение объёмного заряда и электрического поля используется для вычисления электродинамической силы, которая вводится в уравнение движения как объёмный источник на следующей итерации, обеспечивая самосогласованность решения.

Расчётная модель, отражённая на схеме на рис. 2, представляет собой двухмерную геометрию, включающую воздушный канал и прилегающую нагреваемую пластину из алюминия. Для снижения вычислительной сложности задача решалась на половине симметричной системы с применением условия симметрии по центральной оси канала. На входной границе задавалась величина расхода газа \dot{m} , которая определялась в соответствии с характеристикой используемого вентилятора, при его постоянной температуре, равной 293 К. На выходе из системы, обозначенного как «Сток», устанавливалось нулевое статическое давление и условие уноса тепла. В твёрдой области (алюминиевой пластине) решалось уравнение теплопроводности с учётом интегральной подводимой мощности $P_{нагр}$; на наружных поверхностях пластины, включая участки вне канала, применялось условие термической изоляции. Гидродинамические граничные условия на всех твёрдых стенках задавались как условия прилипания в низкорейнольдсовом приближении, обеспечивая корректное разрешение вязкого подслоя. Потенциал $\phi = V_{var}$ на проводниках варьировался для достижения заданной мощности КР в системе, в соответствии с получаемыми в эксперименте. Инжекция заряда на поверхности проводов активировалась при достижении локальной напряжённости электрического поля порогового значения, определяемого по формуле Пика с параметрами $E_0 = 30$ кВ/см и $\gamma = 0,03$ [11].

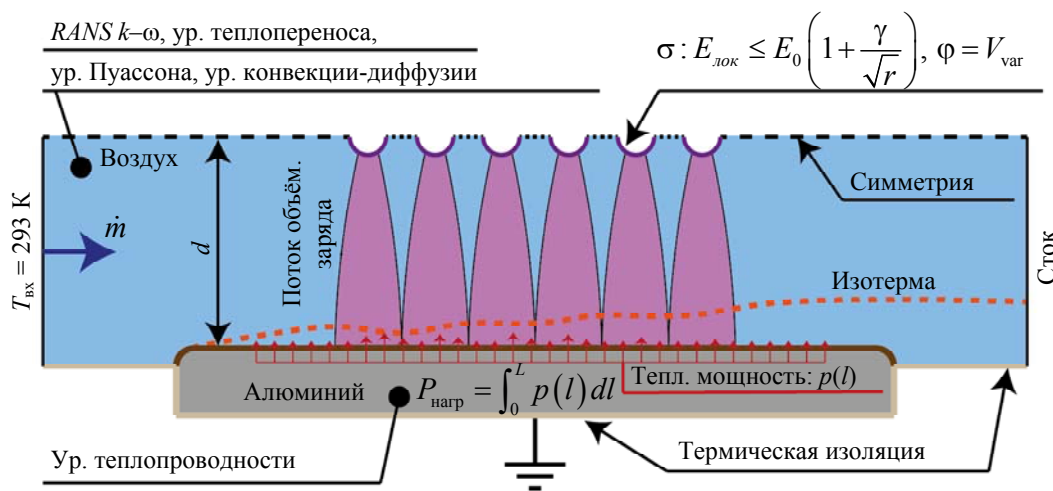


Рис. 2. Схематичное изображение расчётной области с воздушным каналом, нагреваемой алюминиевой пластиной и системой коронирующих электродов

Ключевые результаты параметрического исследования приведены на рис. 3. Показано, что увеличению добавочной температуры охлаждения $\Delta T_{\text{кор}}$ в зависимости от мощности коронного разряда соответствует квадратичная зависимость, что согласуется с экспериментально зарегистрированной вольт-амперной характеристикой разряда.

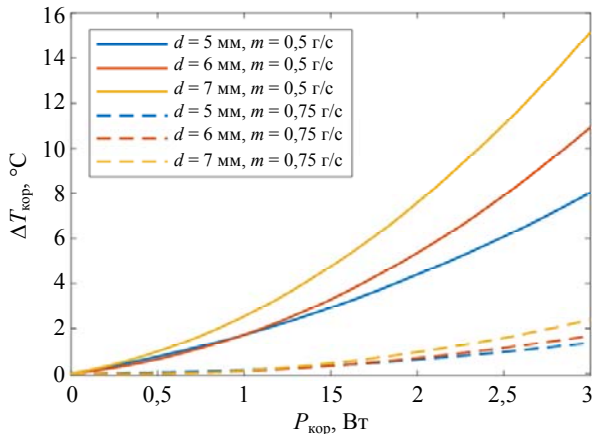


Рис. 3. Расчетная зависимость перепада температуры $\Delta T_{\text{кор}}$ охлаждаемых пластин от мощности коронного разряда при различных ширине канала d и объемном расходе m

Как видно из зависимостей на рис. 3, определяющим параметром является скорость потока. При массовом расходе 0,75 г/с энергетический вклад объемных сил в общую мощность массопереноса недостаточен, чтобы оказать существенное влияние на распределение температуры, и величина $\Delta T_{\text{кор}}$ остаётся относительно малой. В случае меньшего расхода 0,5 г/с для всех исследованных расстояний между проводом и алюминиевой пластиной (5, 6 и 7 мм) наблюдается выраженное увеличение добавочного охлаждения (рост $\Delta T_{\text{кор}}$): при увеличении зазора канал расширяется, средняя скорость снижается, и эффективность охлаждения возрастает.

Полученные в расчете пространственные распределения полей температур и скоростей также показали, что в рассмотренном диапазоне параметров «запирающий эффект» (*blocking effect*) [4] практически не проявляется: формируемые разрядом вихревые структуры не приводят к заметному нарушению сквозного течения.

Экспериментальные результаты

На рис. 4,а показана зависимость установившегося перепада температуры $\Delta T_{\text{кор}}$ после зажигания коронного разряда при его различной мощности $P_{\text{кор}}$ для фиксированного объемного расхода вентилятора $m = 0,8$ г/с. Можно отметить, что в исследуемых условиях ЭГД поток демонстрирует наибольшую эффективность в диапазоне малых значений мощности КР (до 0,5 Вт), что согласуется с расчетными результатами. В дальнейшем перепад температуры выходит в насыщение и повышение мощности КР становится нецелесообразным.

Расчитанное по всему массиву данных максимальное соотношение перепада температуры при охлаждении ЭГД-поток к затрачиваемой на его создание мощности при разных расходах принудительной конвекции m и ширине канала d (рис. 4,б) позволяет подтвердить выводы о необходимости обеспечения объемных сил ЭГД-потока, достаточных для изменения процессов тепло- и массопереноса вблизи нагреваемых поверхностей, что позволит наиболее эффективно интенсифицировать теплообмен. При расходе воздуха порядка 0,8 г/с удается достичь снижения температуры в 30–40 °С на 1 Вт вложенной в КР электрической мощности.

В то же время, наблюдается ряд противоречий с результатами проведенного моделирования. Ширина канала d оказывает относительно слабое и бессистемное влияние на регистрируемые в эксперименте значения $\Delta T_{\text{кор}}$ при фиксированных расходах воздуха m , а также в расчетах не воспроизводится эффект насыщения $\Delta T_{\text{кор}}$ с увеличением $P_{\text{кор}}$. Можно предположить, что это может быть связано как с процессами нагрева газа интенсивным КР [12], так и возникновением условий для образования застойных областей вблизи нагреваемых поверхностей [4]. Это предполагает необходимость более детального воспроизведения геометрических особенностей канала, работы нагнетающего вентилятора и условий горения КР.

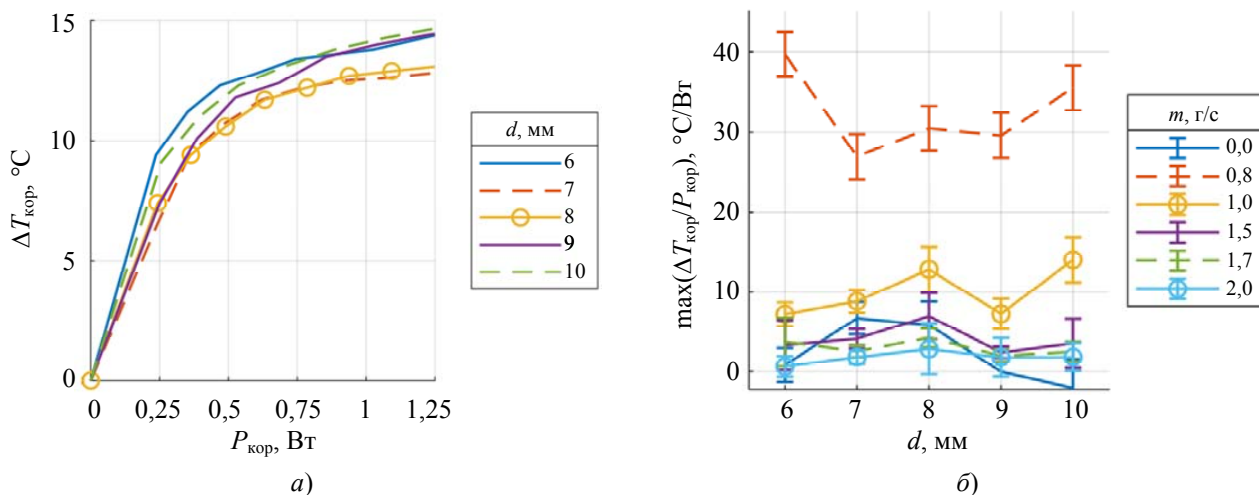


Рис. 4. Зависимость перепада температуры ΔT_{kop} от мощности КР P_{kop} для различных значений ширины канала d при фиксированном расходе вентилятора $m = 0,8$ г/с (а) и максимального соотношения $\Delta T_{kop}/P_{kop}$ при различных d и m (б)

Выводы

Проведенное расчетное исследование эффективности охлаждения с помощью ЭГД-потоков в прямоугольном канале при наличии принудительной конвекции воздуха показало, что применение ЭГД-потоков оказывается энергетически эффективным при соблюдении условий достаточного энерговклада создаваемых объемных сил для модификации основного потока. Экспериментальные результаты показали сложную зависимость снижения температуры стенок канала от его геометрических параметров и мощности ЭГД-потока, что может быть связано с процессами нагрева воздуха в разряде или возникновении «запирающего эффекта». Полученные данные будут использованы в рамках дальнейшей разработки устройства комбинированного охлаждения с использованием ЭГД-потоков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям

научно-технологического развития, договор № 075-15-2024-543).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maria C. et al. / Appl. Therm. Eng. 2023. Vol. 227. P. 120427.
2. Iranshahi K. et al. / International Journal of Heat and Mass Transfer. 2024. Vol. 232. P. 125895.
3. Jadhao R. R., Chitragar P., Kamble D. / Phys. Scr. 2025. Vol. 100. № 3. P. 32002.
4. Wang Y. B. et al. / Phys. Fluids. 2023. Vol. 35. № 11.
5. Хомич В. Ю., Ямщиков В. А. / Успехи физических наук. 2017. Т. 187. № 6. С. 653–666.
6. Мошкунев С. И. и др. / Прикладная физика. 2011. № 6. С. 32–38.
7. Воеводин В. В. и др. / Труды XII Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения». – Новосибирск, 2024. С. 25.
8. Ming G. et al. / Int. Commun. Heat Mass Transf. 2024. Vol. 153. P. 107344.
9. Reza B. L., Majid M. / J. Electrostat. 2012. Vol. 70. № 1. P. 31–42.
10. Wilcox D. C. Turbulence Modeling for CFD. – La Cañada: DCW Industries, 1998.
11. Peek F. W. Jr. Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering. – New York: McGraw-Hill Book Company, inc., 1915.
12. Jones J. E. / J. Electrostat. 2008. Vol. 66. № 1–2. P. 84–93.

Performance study of a channel cooling system with EHD flows

V. V. Voevodin^{1,2,*}, Ya. E. Zharkov¹, A. S. Kirillov¹, O. I. Korzhova¹, S. I. Moshkunov¹
and V. U. Khomich¹

¹ Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, 191181 Russia

* E-mail: vvvoevodin@ieeras.ru

² Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, 630090 Russia

Received 6.11.2025; revised 19.11.2025; accepted 11.12.2025

A combined numerical and experimental study was conducted on a model channel cooling system utilizing forced air convection and auxiliary electrohydrodynamic (EHD) flows generated by a corona discharge. Geometric parameters of the channel and the power supplied to the devices generating the cooling flows were varied. For the given conditions, the range of effective use of EHD flows was demonstrated, and a non-linear relationship between the channel wall temperature and the power of the corona discharge generating the EHD flow was revealed.

Keywords: Electrohydrodynamics (EHD); Electric wind; Plasma turbulator; Channel cooling systems.

REFERENCES

1. Maria C. et al., Applied Thermal Engineering **227**, 120427 (2023).
2. Iranshahi K. et al., International Journal of Heat and Mass Transfer **232**, 125895 (2024).
3. Jadhao R. R., Chitragar P. and Kamble D., Physica Scripta **100** (3), 32002 (2025).
4. Wang Y. B. et al., Physics of Fluids **35** (11), [article number] (2023).
5. Khomich V. Yu. and Yamshchikov V. A., Uspekhi Fizicheskikh Nauk **187** (6), 653–666 (2017).
6. Moshkunov S. I. et al., Applied Physics, № 6, 32–38 (2011) [in Russian].
7. Voevodin V. V. et al. In Proceedings of the XII All-Russian Conference with International Participation "Fuel Combustion: Theory, Experiment, Applications", Novosibirsk, 2024, pp. 25.
8. Ming G. et al., International Communications in Heat and Mass Transfer **153**, 107344 (2024).
9. Reza B. L. and Majid M., Journal of Electrostatics **70** (1), 31–42 (2012).
10. Wilcox D. C. Turbulence Modeling for CFD. La Cañada, DCW Industries 1998.
11. Peek F. W. Jr. Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering. New York, McGraw-Hill Book Company, inc., 1915.
12. Jones J. E., Journal of Electrostatics **66** (1–2), 84–93 (2008).

Об авторах

Воеводин Вадим Вадимович, к.т.н., старший научный сотрудник, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А); Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН (630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1). E-mail: vvvoevodin@ieeras.ru SPIN-код: 1049-1177, AuthorID: 1013023

Жарков Ярослав Евгеньевич, научный сотрудник, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А). E-mail: yarik77794@mail.ru SPIN-код: 1619-1493, AuthorID: 1142014

Кириллов Александр Сергеевич, младший научный сотрудник, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А). E-mail: caduceus.kas@gmail.com SPIN-код: 3924-1556, AuthorID: 1193477

Коржова Ольга Игоревна, младший научный сотрудник, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А). E-mail: oikorzhova@ieeras.ru SPIN-код: 1627-1919, AuthorID: 1260716

Мошкунов Сергей Игоревич, д.т.н., чл.-корр. РАН, руководитель научного направления «Импульсная техника и электрофизика», Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А). E-mail: serg-moshkunov@yandex.ru SPIN-код: 4103-8401, AuthorID: 161510

Хомич Владислав Юрьевич, д.ф.-м.н., академик РАН, научный руководитель, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 18, литера А). E-mail: khomich@ras.ru SPIN-код: 6924-8941, AuthorID: 167051