

ФИЗИКА

Научная статья
УДК 536.34

Интенсификация теплообмена посредством электроконвекции

Николай Андреевич Шаталов¹, Елена Ивановна Толмачева², Андрей Федорович Шаталов³

¹Ставропольский колледж связи имени Героя Советского Союза В.А. Петрова, Ставропольский край, г. Ставрополь, Россия

²Северо-Кавказский социальный институт, Ставропольский край, г. Ставрополь, Россия

^{2,3}Ставропольский государственный педагогический институт, Ставропольский край, г. Ставрополь, Россия

¹nas777@mail.ru

²elena_kamenichenko@mail.ru

³afs777@mail.ru

Аннотация. Найдена зависимость коэффициента теплоотдачи в системе игла-плоскость. Проанализирована зависимость коэффициента теплоотдачи от межэлектродного напряжения при различной ориентации по отношению к вектору массовых сил. Для получения максимального прироста коэффициента теплоотдачи плоского нагревателя, необходимо обеспечить взаимосвязь между поперечным размером охлаждаемой поверхности и межэлектродным расстоянием.

Ключевые слова: теплообмен, электроконвекция, электрогидродинамический поток, тепловой поток, коэффициент теплоотдачи

Для цитирования: Шаталов Н.А., Толмачева Е.И., Шаталов А.Ф. Интенсификация теплообмена посредством электроконвекции // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2026. Т. 16, № 2. С. 43–48.

PHYSICS

Original article

Intensification of heat exchange through electrical convection

Nikolay A. Shatalov¹, Elena I. Tolmacheva², Andrey F. Shatalov³

¹Stavropol College of Communications named after Hero of the Soviet Union V.A. Petrov, Stavropol Territory, Stavropol, Russia

²North Caucasus Social Institute, Stavropol Territory, Stavropol, Russia

^{2,3}Stavropol State Pedagogical Institute, Stavropol Territory, Stavropol, Russia

¹nas777@mail.ru

²elena_kamenichenko@mail.ru

³afs777@mail.ru

Abstract. The dependence of the heat transfer coefficient in a needle-to-plane electrode system has been established. The relationship between the heat transfer coefficient and the applied interelectrode voltage was analyzed for different orientations relative to the body force vector. To achieve the maximum increase in the heat transfer coefficient of a flat heater, it is necessary to ensure a specific relationship between the transverse dimension of the cooled surface and the interelectrode distance.

Keywords: heat exchange, electroconvection, electrohydrodynamic flow, heat flow, heat transfer coefficient

For citation: Shatalov N.A., Tolmacheva E.I., Shatalov A.F. Intensification of heat exchange through electrical convection. *Proceeding of the Kabardino-Balkarian State University*. 2026; 16(2):43–48. (In Russ.).

Постановка задачи

Эффективный способ интенсификации теплообмена в жидкостях и газах – это создание их принудительного движения. В литературе ранних лет показано, что коэффициент теплоотдачи α – основной параметр, характеризующий интенсивность теплообмена, – является функцией относительной скорости нагретой поверхности [1–3]

$$\alpha = \alpha(u). \quad (1)$$

При малых скоростях число Нуссельта, определяемое через коэффициент теплоотдачи, $Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$, пропорционально числу Рейнольдса $Re = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\eta}$ в степени $\frac{1}{2}$ [2]. Поэтому достаточно точно можно считать, что выполняются зависимость вида:

$$\alpha = \alpha_0 + h \cdot (|u|)^{0,5}, \quad (2)$$

где h – константа, определяемая условиями теплообмена и формой нагретой поверхности. Для тонких нагревателей эта константа определяется выражением $h = \sqrt{\pi R c \lambda}$. Для плоских поверхностей коэффициент теплоотдачи определяется по формуле:

$$\bar{\alpha} = \frac{Nu_{ж,l} \lambda}{l}, \quad (3)$$

где $Nu_{ж,l}$ – число Нуссельта, λ – коэффициент теплопроводности среды, l – размер меньшей стороны пластины.

Решались задачи:

- 1) найти оптимальное соотношение между числом игольчатых электродов, межэлектродным напряжением и расстоянием от охлаждаемой поверхности до острия игольчатых электродов, при котором наблюдается максимум интенсификации теплообмена;
- 2) определить эффективность применения ребер в условиях принудительного течения жидкости под действием электрического поля, которое принципиально отличается от течения, создаваемого насосами.

Методика эксперимента

В представленной работе для создания принудительного движения трансформаторного масла использовалось электрическое поле [4–8].

В опытах поверхности, не контактирующие с маслом, теплоизолировались. Электрическое поле создавалось подведением постоянного регулируемого напряжения к противоэлектродам и нагретым поверхностям, расстояния между ними изменяли. Измерения, расчеты и анализ погрешностей проводили по методикам, изложенным в [9–12].

Интегральный коэффициент теплоотдачи рассчитывался по стандартной методике с использованием соотношения:

$$\alpha = \frac{q}{T_{cm} - T}, \quad (4)$$

где q – удельный тепловой поток к жидкости, находимый по мощности тока в пластине-нагревателе, T_{cm} – температура нагревателя, определяемая методом термометра сопротивления, а также медь-константановыми термopарами, T – температура масла на удалении от нагретой поверхности, фиксируемая ртутным термометром с ценой деления 0,5 град.

Использовался также относительный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha^* = \alpha_{эл} / \alpha_{грав}, \quad (5)$$

где $\alpha_{эл}$ и $\alpha_{грав}$ – интегральные коэффициенты теплоотдачи при электрической и гравитационной конвекции, соответственно.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Первая серия опытов была проведена с противозэлектродами в виде игл. Они располагались над охлаждаемой плоской поверхностью. На рисунке 1 показано относительное увеличение коэффициента α^* . При напряжениях до 3 кВ параметр α^* прямо растет с увеличением числа электродов.

При больших напряжениях зависимость оказывается более сложной. Характерно, что при малых межэлектродных расстояниях, начиная с 4 кВ зависимость $\alpha^*(U)$ заметно ослабевает, при больших расстояниях, в рассмотренном диапазоне напряжений, она приближается к линейной.

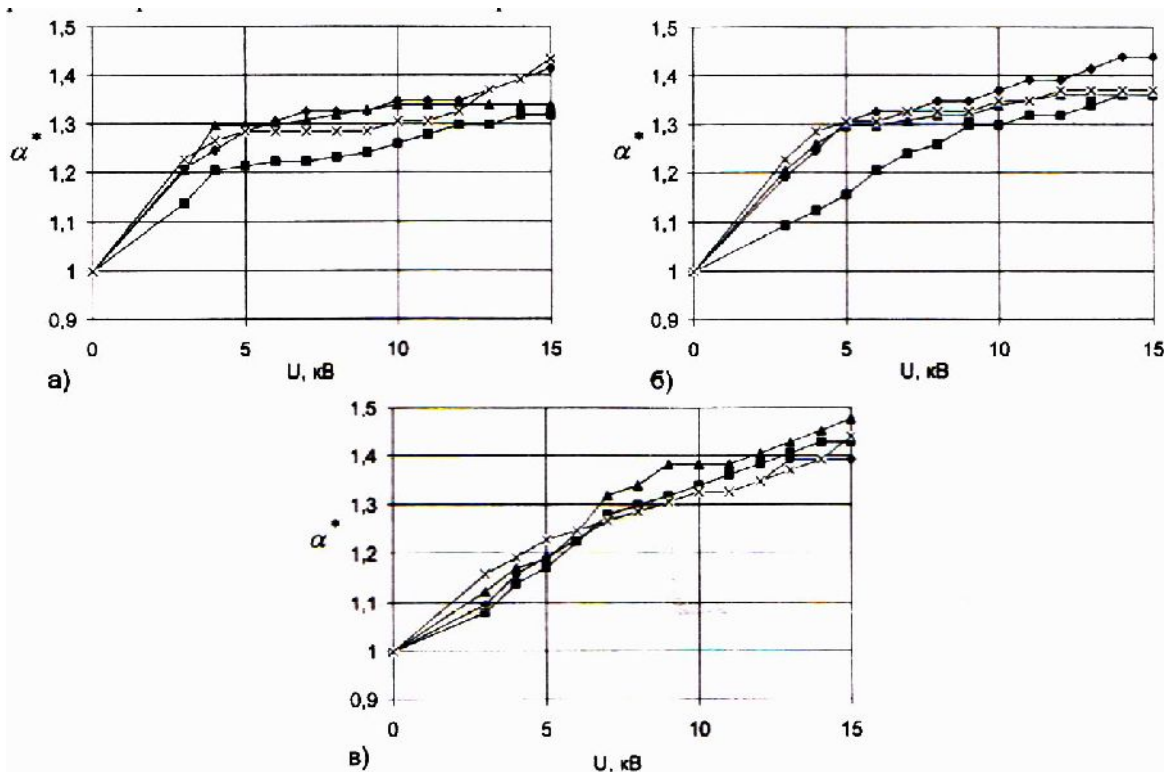


Рисунок 1 – Зависимость относительного коэффициента теплоотдачи α от межэлектродного расстояния и количества игольчатых электродов: а) $l_0 = 3$ мм; б) $l_0 = 10$ мм; в) $l_0 = 20$ мм.

Количество игл: ■ – $n = 1$; ▲ – $n = 2$; ◆ – $n = 3$, × – $n = 4$

Существенное влияние на функциональную зависимость $\alpha^*(U)$ оказывают расстояния l_0 между острием игл и нагретой поверхностью. Так, уменьшение межэлектродного расстояния сопровождается уменьшением роста относительного коэффициента теплоотдачи.

Обнаруженная зависимость на первый взгляд противоречит тому, что с ростом напряженности электрического поля интенсивность электроконвективных явлений, а стало быть, и коэффициент теплоотдачи должны возрастать. С уменьшением расстояния напряженность электрического поля между электродами растет, однако объем области, где происходит электроконвективное течение, локализован между острием илы и поверхностью охлаждения, то есть связан не только с напряженностью поля, но и с межэлектродным расстоянием [3, 4]. В объеме где происходит течение, его развитость оценивается безразмерным числом [4]:

$$\Gamma = l_0 \sigma / (v \epsilon \epsilon_0), \quad (6)$$

где σ – удельная электрическая проводимость жидкости, v – скорость потоков.

Это число дает отношение времени пересечения жидкостью межэлектродного промежутка ко времени релаксации электрического заряда. В объеме, размер которого соизмерим с межэлектродным расстоянием, течение охватывает всю жидкость, когда число Γ принимает значения более 90 [4].

В нашем случае размеры сосуда велики по отношению к межэлектродному промежутку, поэтому течению подвержена лишь часть объема между иглой и поверхностью.

Радиус области, охваченной течением в радиальном к оси иглы направлении, определяется формулой [4]:

$$R = (0,75 - 1) \cdot S. \quad (7)$$

В свою очередь, размер S в осевом направлении пропорционален межэлектродному напряжению U :

$$S = 0,016 \cdot U \quad (8)$$

и при $\Gamma = 90$ занимает только межэлектродный промежуток, поэтому дальнейшее повышение напряжения уже не вызывает заметного роста величины R и соответственно коэффициента теплоотдачи.

Очевидно, уменьшение межэлектродного расстояния l_0 должно приводить к уменьшению площади нагревателя, обтекаемого электроконвективными потоками и, соответственно, к уменьшению интегрального коэффициента теплоотдачи.

В случае с несколькими игольчатыми электродами, ввиду зависимости S и R от напряжения U , между электродами при высоких значениях напряжения наблюдается сложное взаимодействие между гравитационными и ЭГД потоками, а также взаимодействие ЭГД потоков соседних игольчатых электродов между собой, что приводит к снижению коэффициента теплоотдачи.

На зависимость коэффициента теплоотдачи оказывает также влияние ориентация электродной системы по отношению к вектору массовых сил (рисунок 2).

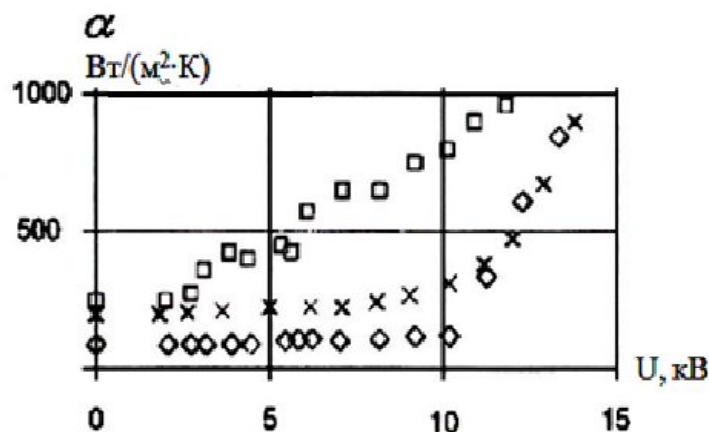


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от межэлектродного напряжения при различной ориентации по отношению к вектору массовых сил:

□ – нагреватель снизу, × – нагреватель сбоку, ◇ – нагреватель сверху

При расположении нагретой поверхности сверху от иглы гравитационная конвекция отсутствует, теплые слои удерживаются у нагревателя силами плавучести, а теплообмен без поля осуществляется теплопроводностью. Подача на электродную систему напряжения вплоть до 10 кВ не меняет коэффициента теплоотдачи. При дальнейшем повышении напряжения коэффициент α резко нарастает по степенной зависимости, далее по линейной с угловым коэффициентом порядка 0.06, вплоть до напряжений 25–30 кВ. Чтобы привести нагретые слои в движение у горячей поверхности ЭГД поток должен иметь достаточную кинетическую энергию.

При расположении нагретой пластины снизу наблюдается сложное взаимодействие конвективных и электрогидродинамических потоков, результатом которого является уменьшение порогового напряжения, при котором начинает интенсифицироваться теплообмен до 2500 В и линейный рост коэффициента α вплоть до его стабилизации.

При вертикальном расположении нагретой пластины, а иглы сбоку от нее, между собой взаимодействуют горизонтальные электроконвективные и вертикальные гравитационные потоки (рисунок 3).

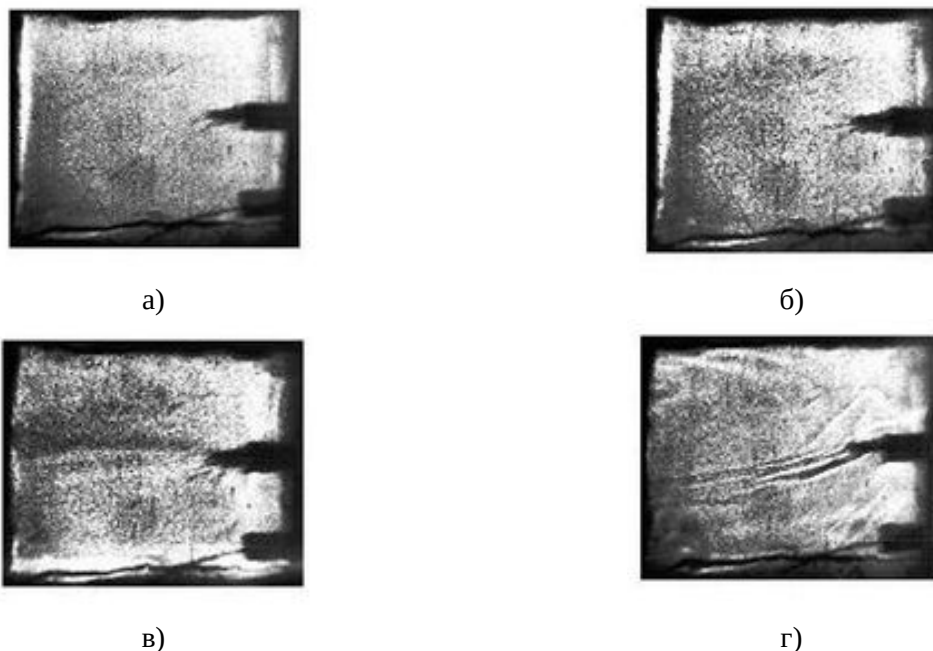


Рисунок 3 – Фотографии электроконвективных и гравитационных потоков, создаваемых игольчатым электродом при вертикальном расположении плоского нагревателя.
Потенциал иглы: а) 5000 В; б) 7500 В; в) 10000 В; г) 15000 В

В этом случае нижняя часть пластины имеет локальный перегрев по отношению к верхней. Интегральный коэффициент теплоотдачи растет пропорционально квадрату межэлектродного напряжения.

Выводы

Из изложенного экспериментального материала можно сделать следующие выводы: электроконвекция – эффективное средство интенсификации теплообменных процессов. Для достижения максимального увеличения коэффициента теплоотдачи плоского нагревателя требуется, чтобы между поперечным размером охлаждаемой поверхности и межэлектродным расстоянием была связь, определяемая формулами (7) и (8). Выполнение этих соотношений можно достичь расположением не одной, а нескольких игл. Путем изменения межэлектродного напряжения можно в широких пределах регулировать рост коэффициента теплоотдачи, а изменениями расстояния между острием иглы и плоскостью – величину углового коэффициента $\alpha(U)$.

Библиография

1. Галицейский Б.М., Рыжов Ю.А., Якуш Е.В. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках. М.: Машиностроение, 1977. 256 с.
2. Теплотехника: учебник / под ред. В.Н. Луканина, М.Г. Шатрова, Г.М. Камфера и др. М.: Высшая школа, 2002. 671 с.
3. Ройзен Л.И., Дулькин И.Н. Тепловой расчёт ребренных поверхностей. М.: Энергия, 1977. 254 с.
4. Стишков Ю.А., Остапенко А.А. Электрогидродинамические течения в жидких диэлектриках. Л.: ЛГУ, 1989. 119 с.
5. Остроумов Г.А. Взаимодействие электрических и гидродинамических полей. М.: Наука, 1979. 319 с.
6. Гросу Ф.П., Болога М.К. Электроконвективные явления и интенсификация теплообмена // Электронная обработка материалов. 1977. № 5. С. 51–62.
7. Гросу Ф.П., Болога М.К. Одномерные термоэлектрогидродинамические течения слабопроводящей жидкости // Сб. Магнитная гидродинамика. М., 1974. Вып. 1. С. 7–19.
8. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. Электроконвекция и теплообмен. Кишинев: Штиинца, 1977. 320 с.
9. Якушев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарных температур. Л.: Энергия, 1967. 299 с.

10. Кондратьев Г.М. Тепловые измерения. М.–Л.: Машгиз, 1957. 299 с.
11. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин. М.–Л.: Гостехиздат, 1959. 283 с.
12. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974. 108 с.

References

1. Galitsky B.M., Ryzhov Yu.A., Yakush E.V. Thermal and hydrodynamic processes in oscillating flows. Moscow: Mechanical Engineering, 1977. 256 p. (in Russ.).
2. Lukanin V.N., Shatrov M.G., Kamfer G.M., et al. (Eds.). Heat Engineering. Moscow: Vysshaya shkola, 2002. 671p. (in Russ.).
3. Roizen L. I., Dulkan I. N. Thermal Calculation of Finned Surfaces. Moscow: Energiya, 1977. 254 p. (in Russ.).
4. Stishkov Yu.A., Ostapenko A.A. Electrohydrodynamic Flows in Liquid Dielectrics. Leningrad: Leningradskiy universitet, 1989. 119 p. (in Russ.).
5. Ostroumov G.A. Interaction of Electric and Hydrodynamic Fields. Moscow: Nauka, 1979. 319 p. (in Russ.).
6. Grosu F.P., Bologa M.K. Electroconvective Phenomena and Heat Transfer Intensification // *Elektron-naya obrabotka materialov = Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 1977;5:51–62. (in Russ.).
7. Grosu F.P., Bologa M.K. One-Dimensional Thermoelectrohydrodynamic Flows of a Weakly Conducting Liquid // *Magnitnaya gidrodinamika = Magnetohydrodynamics*. 1974;1:7–19. (in Russ.).
8. Bologa M.K., Grosu F.P., Kozhukhar I.A. Electroconvection and Heat Transfer. Kishinev: Shtiintsa, 1977. 320 p. (in Russ.).
9. Yakushev N.A. Theoretical Foundations of Non-Stationary Temperature Measurement. Leningrad: Energiya, 1967. 299 p. (in Russ.).
10. Kondratev G.M. Thermal Measurements. Moscow-Leningrad: Mashgiz, 1957. 299 p. (in Russ.).
11. Turichin A.M. Electrical Measurements of Non-Electrical Quantities. Moscow-Leningrad: Gostekhizdat, 1959. 283 p. (in Russ.).
12. Zaydel A.N. Errors in Measurements of Physical Quantities. Leningrad: Nauka, 1974. 108 p. (in Russ.).