

CZU: 536.7:537.312.7:536.14:537.872.2

DOI: 10.46727/c.v1.18-19-03-2023.p315-319

## ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В МИНИКАНАЛАХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

### INTENSIFICATION OF HEAT TRANSFER IN MINI-CHANNELS UNDER THE INFLUENCE OF AN ELECTRIC FIELD

*Олег Моторин, к.т.н., вед.н.с., ИПФ ГУМ, Кишинев*  
*Мирча Болога, д.т.н., профессор, ИПФ ГУМ, Кишинев*

*Oleg Motorin, PhD, ld. res., IAP MSU from Chisinau*  
*ORCID: 0000-0001-7529-2616, motorin@yahoo.com*  
*Mircea Bologa, PhD, professor, IAP MSU from Chisinau*  
*ORCID: 0000-0002-5262-9666*

**Аннотация.** Изучено влияние плотности теплового потока и электрического поля на теплообмен при прокачке диэлектрической жидкости в миниканалах с помощью электрогидродинамического насоса. Установлено, что с ростом теплового потока коэффициент теплоотдачи возрастает во всем исследованном диапазоне напряжений на электродах. Наиболее сильное влияние поля на теплообмен наблюдается при низких плотностях теплового потока. Электрическое поле действует как на паровые пузырьки, так и на диэлектрическую жидкость, изменяя таким образом гидродинамику движения жидкости, а следовательно, и интенсивность теплообмена. Проведено обобщение экспериментальных данных, показано хорошее согласование экспериментальных данных с рассчитанными по аналитическим зависимостям. Результаты проведенного исследования могут найти применение при проектировании систем охлаждения различного назначения.

**Ключевые слова:** *mini-channels, electric field, heat transfer, heat flux density.*

**Abstract.** *The influence of the heat flux density and electric field on heat transfer during pumping of a dielectric liquid in mini-channels is studied. It is established that with an increase in the heat flux, the heat transfer coefficient increases in the entire studied range of voltages on the electrodes. The strongest influence of the field on heat transfer is observed at low heat flux densities. The electric field acts both on the vapor bubbles and on the dielectric liquid, thus changing the hydrodynamics of the liquid motion and, consequently, the intensity of heat transfer. Generalization of experimental data is carried out, good agreement between experimental data and those calculated from analytical dependences is shown. The results of the study can be used in the design of cooling systems for various purposes.*

**Keywords:** *boiling, heat transfer, heat flow, electric field*

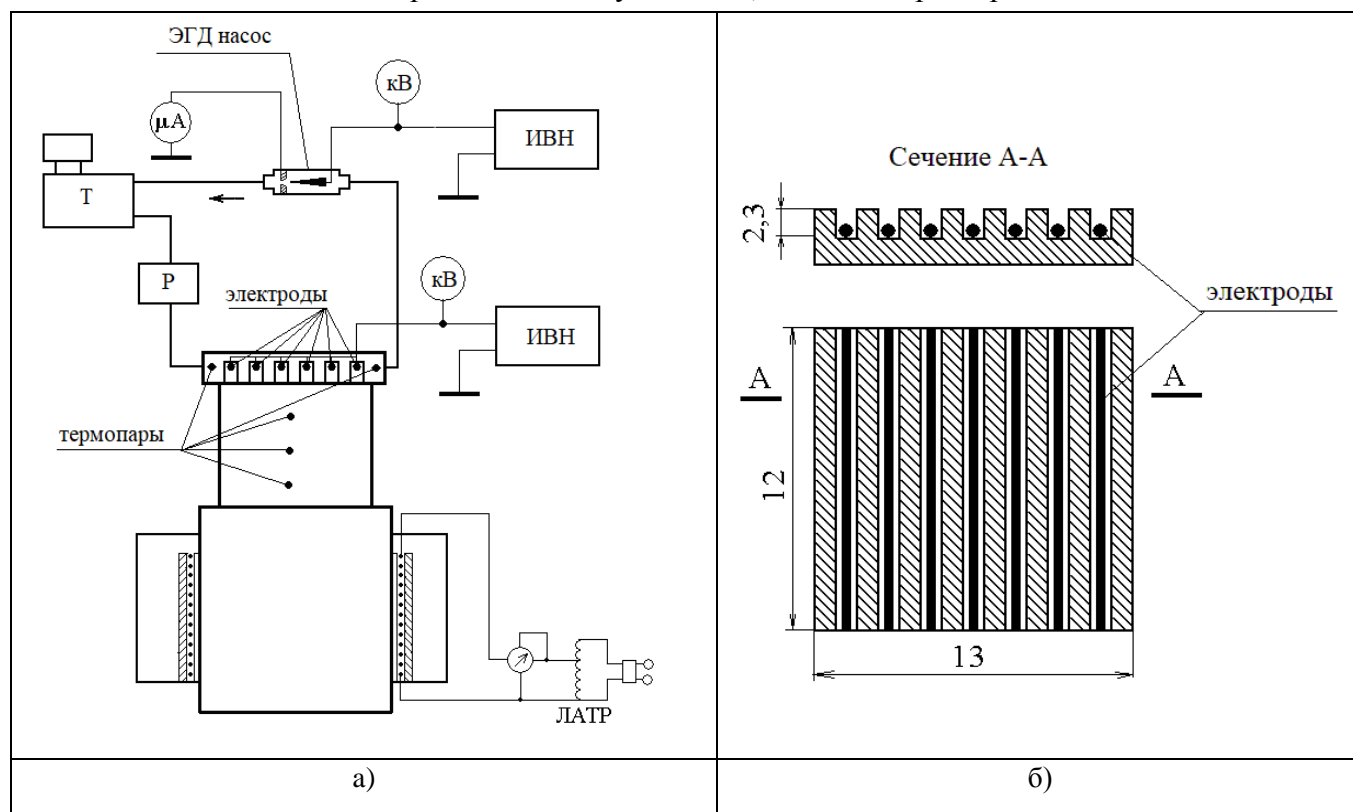
#### **Введение**

Миниатюризация, начавшаяся в конце прошлого века, привела к появлению малогабаритных устройств в различных областях нашей жизни: в промышленности, медицине, бытовой технике, в космосе. Плотности тепловых потоков в них могут превышать  $100 \text{ Вт/см}^2$  [1], поэтому эффективность и надежность работы этих устройств во многом зависит от правильной организации теплоотвода. Вследствие малых размеров охлаждаемых объектов, традиционные способы охлаждения, такие как естественная и вынужденная

конвекции воздуха, не справляются с поддержанием требуемых температурных режимов. Использование микканалов, наряду с погружным охлаждением и тепловыми трубами, является одним из способов существенной интенсификации теплоотвода. В предлагаемой работе рассматривается охлаждение в микканалах при прокачке теплоносителя с помощью малогабаритного электрогидродинамического (ЭГД) насоса совместно с одновременным воздействием электрического поля на зону теплосъема. Эксперименты проводились при в диапазоне изменения режимных параметров  $q = 5 \cdot 10^3 - 6,5 \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup>,  $U = 0 - 20$  кВ.

### Экспериментальная установка и методика исследований

Исследование теплообмена проводилось на установке, схема которой представлена на Рис. 1.



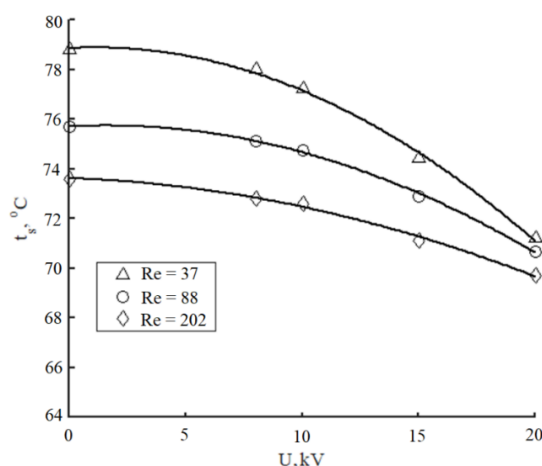
**Рис. 1.** (а) Схема экспериментальной установки; (б) Вид сверху и поперечное сечение микканалов из плексигласа. Т – термостат, Р – расходомер, ИВН – источник высокого напряжения, кВ – киловольтметр, μА – микроамперметр

Установка состоит из следующих основных частей: исследуемый участок, нагреватель, ЭГД-насос, термостат, источники высокого напряжения и измерительная часть. Исследуемый участок представлял собой пластину из плексигласа, в которой были вырезаны 7 каналов прямоугольного сечения с размерами 0,65г 2,3 мм. В качестве высоковольтных электродов использовались отрезки медной проволоки диаметром 0,45 мм, которые устанавливались в верхней части каналов параллельно поверхности нагревателя (заземленного электрода). Пластина из плексигласа с помощью специальных разъемов плотно прижималась к латунному стержню круглого сечения, который одновременно служил и нагревателем и заземленным электродом. Для герметизации соединения между пластиной и стержнем устанавливалась тонкая резиновая прокладка. Плотность подводимого теплового потока измерялась с

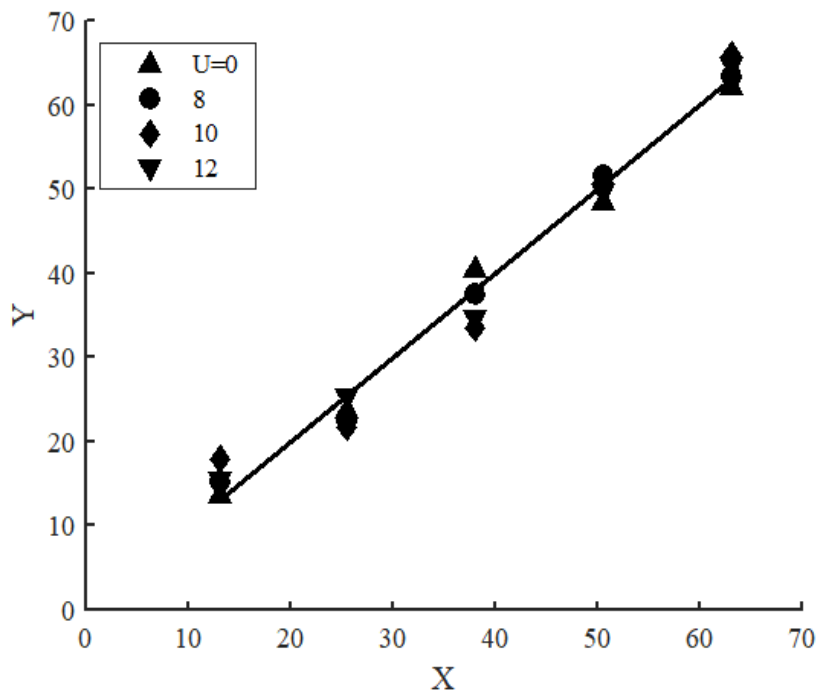
помощью трех медь-константановых термопар, установленных с шагом 10 мм вдоль стержня. Циркуляция теплоносителя в контуре осуществлялась ЭГД-насосом, а его постоянная температура на входе в исследуемый участок обеспечивалась пропуском теплоносителя через змеевик, погруженный в термостат. Расход теплоносителя определялся с помощью калориметрического расходомера, который представляет собой стеклянную трубку с внутренним диаметром 3 мм, внешним диаметром 5 мм и длиной 110 мм. Нагрев осуществляется с помощью нихромовой спирали длиной 10 мм, расположенной в центральной части расходомера. На расстоянии 20 мм от концов спирали, по обе ее стороны, на внешней стороне стеклянной трубки были установлены термопары. Нагреватель, а также сам расходомер были тщательно теплоизолированы.

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Для подтверждения правильности методики измерения проводились предварительные исследования зависимости  $a = f(q)$  в отсутствие электрического поля. Получены результаты, которые удовлетворительно согласуются с известными из литературы опытными данными по теплообмену в миканалах [2,3]. Зависимости средней температуры дна каналов от скорости прокачки в зависимости от напряжения на высоковольтных электродах представлены на рис. 2. Установлено, что увеличением напряжения на электродах температура теплоотдающей поверхности уменьшается для всего диапазона скоростей ЭГД прокачки. Интенсивность теплообмена в миканале определяется совместным влиянием движения прокачиваемой жидкости и воздействием поля на процесс кипения. Воздействие поля приводит к более раннему отрыву пузырьков от поверхности нагрева. После отрыва пузырька его место занимают более холодные слои жидкости. В результате возникает режим интенсивного перемешивания, который приводит к значительному росту интенсивности теплоотдачи. Обобщение экспериментальных зависимостей коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока при различных напряжениях проводилось согласно методике, подробно описанной в [4].



**Рис. 2. Зависимость средней температуры дна канала нагревателя от напряжения на электродах. Теплоноситель – н-гексан, подводимая тепловая мощность 25 Вт**



**Рис. 3. Обобщенная зависимость коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока при различных напряжениях  $U$  на электродах.**  
 Теплоноситель: н-гексан, массовый расход теплоносителя  $2,9 \cdot 10^{-4}$  кг/с

Предположив, что зависимость коэффициента теплоотдачи от напряжения в исследованном диапазоне является квазилинейной, можно написать:

$$\alpha(U, q) = (\varepsilon + \beta \cdot U) \cdot q + \gamma + \delta \cdot U, \quad (1)$$

где коэффициенты  $\varepsilon$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  находятся с помощью предварительно построенных зависимостей  $a = f(q)$  при выбранных значениях  $U$ . Усредненные значения этих коэффициентов, следующие:

$$\varepsilon = 4,2480, \beta = 3,4341, \gamma = -0,0114, \delta = 23,9793.$$

Отложив по оси ординат выражение

$$Y \in (a - g - d\psi) / (e + b\psi) = q \quad (2)$$

с учетом значений числовых коэффициентов,

$$Y \equiv \frac{\alpha + 0,0114 - 23,9793 \cdot U}{4,2480 + 3,4341 \cdot U} = X \equiv q, \quad (3)$$

и вместо нескольких прямых  $a = f(q)$ , получим биссектрису (Рис. 3), судя по которой, можно заключить, что общая аппроксимация (1) достаточно хорошо отражает зависимость коэффициента теплоотдачи как от плотности теплового потока  $q$ , так и от напряжения на электродах  $U$ .

## **Выводы**

Электрическое поле является эффективным методом интенсификации теплообмена в микросканалах и может с успехом использоваться при разработке и создании систем охлаждения для различной аппаратуры.

*Финансирование работы. Работа выполнена в рамках Институционального проекта ANCD 20.80009.5007.06 при поддержке правительства Республики Молдова.*

## **Список литературы**

1. ZHANG, Y.; FAGHRI, A. Advances and unsolved issues in pulsating heat pipes. *Heat Transfer Engineering*. 2008, 29(1), 20–44. doi: 10.1080/01457630701677114 (IF: 2.431).
2. LIU, D.; GARIMELLA, S.V. Flow boiling heat transfer in microchannels. *ASME Journal of Heat Transfer*. 2007, 129, 1321–1332. doi: 10.1115/1.2754944 (IF: 1.855).
3. DIAZ, M.C.; SCHMIDT, J. Flow boiling of n-hexane in small channels: heat transfer measurements and flow pattern observations. *Chemical Engineering and Technology*. 2007, 30, 389–394. doi: 10.1002/ceat.200600338 (IF: 1.728).
4. БОЛОГА, М.К.; ГРОСУ, Ф.П.; КОЖЕВНИКОВ, И.В.; ПОЛИКАРПОВ, А.А.; МОТОРИН, О.В. Теплообмен в тепловой трубе со встроенным электрогидродинамическим насосом // Труды шестой Российской национальной конференции по теплообмену. В 3 томах. Т.2. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. с. 181-182. ISBN 978-5-383-00911-6