ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ОСМОС В ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ**Ю.В.Килиба, В.А.Киселев, Р.В.Петров, А.С.Татаренко****ELECTROOSMOSIS IN HEAT PIPES****Yu.V.Kiliba, V.A.Kiselev, R.V.Petrov, A.S.Tatarenko***Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Yury.Kiliba@novsu.ru*

Приведен обзор исследований электрического осмоса в пористых и капиллярных структурах. Рассмотрены методы моделирования электроосмотического потока и влияние на него параметров пористых структур. Также проведен анализ влияния на электроосмотический поток магнитного поля и комбинации полей — магнитного и электрического. Рассмотрен пример реализации электроосмотического насоса в системе жидкостного охлаждения, который указывает на перспективность его применения в таких системах, его надежность и технологичность. Однако отсутствие на текущий момент примеров практической реализации электроосмотического насоса в тепловых трубах делает актуальным исследование в этом направлении, что позволит создать новые типы тепловых труб с возможностью их эксплуатации в любом положении в пространстве.

Ключевые слова: осмос, тепловая труба, капиллярный напор, тепловой режим

Для цитирования: Килиба Ю.В., Киселев В.А., Петров Р.В., Татаренко А.С. Электрический осмос в тепловых трубах // Вестник НовГУ. Сер.: Технические науки. 2021. №2(123). С.27-30. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).27-30](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).27-30)

In this article, we reviewed the studies of electric osmosis in porous and capillary structures. We have considered methods for modeling electroosmotic flow and the effect of porous structure parameters on it. We also analyzed the effect of a magnetic field and a combination of fields — magnetic and electric — on the electroosmotic flow. We considered an example of the implementation of an electroosmotic pump in a liquid cooling system, which indicates the prospects of its use in such systems, its reliability and manufacturability. However, there is currently no example of practical implementation of an electroosmotic pump in heat pipes. The lack of practical samples makes research in this direction urgent. Our work will allow us to create new types of heat pipes with the ability to operate them in any position in space.

Keywords: osmosis, heat pipe, capillary head, termal mode

For citation: Kiliba Yu.V., Kiselev V.A., Petrov R.V., Tatarenko A.S. Electric osmosis in heat pipes // Vestnik NovSU. Issue: Engineering Sciences. 2021. №2(123). P.27-30. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2\(123\).27-30](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2021.2(123).27-30)

Введение

Системы, управляемые электроосмотическим потоком (ЭОП), используются в различных областях техники и технологий, таких как биомедицина, геофизика, энергетика и химия. Электрокинетические эффекты широко используются в микро и наножидкостях. Наиболее распространенные применения включают перекачивание [1-3], капиллярную электрохроматографию [4], осушение и регенерацию осушающих структур [5]. Электроосмотический поток имеет много полезных характеристик, включая поршневой поток, который представляет собой простую модель профиля скорости жидкости, отсутствие движущихся частей, простоту реализации и эксплуатации, а также высокую повторяемость и надежность. Соответственно, ЭОП нашел широкое распространение в микрожидкостных полях для таких приложений, как химический или биологический анализ, доставка лекарств, гибридизация ДНК и т. д. Ранние исследования ЭОП были сосредоточены на переносе ньютоновских жидкостей. Однако во многих микрогидравлических системах рабочие жидкости фактически ньютоновские. Таким образом, при разработке эффективных электроосмотических систем важно досконально изучить фундаментальные характери-

стики ньютоновских жидкостей с электрокинетическим приводом. Проблема электрокинетического потока ньютоновской жидкости привлекает все большее внимание в последние годы.

Обзор результатов исследований

ЭОП в микро- и наносистемах с пористыми средами и без них изучался как экспериментально, так и численно многими исследователями, а также рассматривалось поведение ньютоновских жидкостей при ЭОП [6]. Из-за размеров микроканалов получение экспериментальных данных затруднено, и поэтому для прогнозирования ЭОП применяются методы численного моделирования [7,8]. Как было установлено в [5] и [9], внутренний потенциал для плоской поверхности возможно описать уравнением Пуассона, которое может быть линеаризовано для малых значений электрического потенциала с помощью приближения Дебая—Хюккеля [10]. При численном моделировании ЭОП в пористых средах обычно предполагались другие упрощающие гипотезы. Большинство авторов рассматривали только заряд стенок канала, пренебрегая зарядом твердых частиц [11], как в уравнении, определяющем внутренний потенциал, так и в уравнении, описывающем поток жидкости.

Часть исследователей попыталась оценить вклад твердых частиц в ЭОП. Некоторые авторы проанализировали ЭОП на уровне пор [6-8], в то время как другие использовали обобщенную модель потока пористой среды и добавили в уравнение импульса истоковую составляющую, зависящую от плотности заряда пористой среды и приложенного электрического поля [11,12]. Было обнаружено, что основная движущая сила обусловлена заряженными частицами, а не стенками канала [8], и показано, что уравнение внутреннего потенциала не было соответствующим образом модифицировано для учета заряда твердых частиц, за исключением граничных условий [12]. Чтобы учесть заряд как твердых частиц, так и стенок канала [13], скорость разделили на две составляющие, а затем соединили их, чтобы получить общую макроскопическую скорость ЭОП. Первый компонент был получен в соответствии с потоком жидкости в стандартных каналах путем ассимиляции пористой среды в совокупности параллельных извилистых цилиндров. Второй компонент был получен путем применения расширения Бринкмана уравнения Дарси, в котором члены инерции не учитывались из-за низкого числа Рейнольдса. Было обнаружено, что безразмерная скорость Дарси возрастает с увеличением размера частиц, приложенного электрического поля и разницы между дзета потенциалом частиц и стенок канала, и уменьшается с увеличением ширины канала.

Многие авторы сосредоточились на пористых насосах с электрическим осмосом и обнаружили, что термодинамический КПД значительно увеличивается с добавлением пористой среды в канал, поскольку таким образом может быть создано гораздо более высокое давление накачки [8]. В целом, было выявлено, что скорость возрастает с увеличением диаметра твердых частиц или пор [1,3,13,14] и пористости [3,12,15]. Хотя ЭОП может быть увеличен за счет расширения поверхности контакта между электролитом и границами заряженных частиц, чрезмерное уменьшение пустот между частицами [13] может существенно увеличить вязкие потери [1]. Такие потери могут легко повлиять на давление, создаваемое пористым зарядом [3].

Попытки найти оптимальное значение пористости продемонстрировали, что по мере возрастания плотности пор и уменьшения их диаметра увеличиваются как скорость потока, так и характеристики давления насосов с пористой мембраной. В [16] и [17] показано, что перекачка жидкости может быть улучшена в случае, когда слои, прилегающие к твердой стенке насоса, имеют более высокую пористость по сравнению с центральной областью. В этом случае скорость у стенок больше, и поэтому нельзя пренебрегать изменением пористости у стенки [3,6]. В [6] исследовано влияние структуры пористой среды на проницаемость, которая связывает среднюю скорость жидкости с внешним электрическим полем, и выявлено, что проницаемость монотонно растет с увеличением пористости.

ЭОП в пористых средах моделировался с использованием микроскопического подхода во многих

исследованиях. Было обнаружено, что геометрия, используемая для аппроксимации морфологии пористой среды, значительно влияет на прогноз объемной скорости потока, которая, как наблюдалось, была больше в цилиндрических и кольцевых капиллярах, чем в прямоугольных каналах [18]. Морфология пористой среды также была исследована в [19], где проведен анализ проницаемости ЭОП, полученной с использованием гранулированных, волокнистых или сетевых структур. Показано, что при низкой пористости увеличивается проницаемость ЭОП из-за его самого высокого отношения поверхность / объем, тогда как при более высоких значениях пористости зернистая структура работает лучше из-за ее более низкого сопротивления потоку. Из анализа доступной научной литературы по теме ЭОП в пористых средах следует, что работы по этой теме довольно разнородны по своей природе [20]. Несмотря на все попытки, многие фундаментальные аспекты все еще остаются неясными.

Современными исследователями изучается процесс теплопереноса при комбинированном срабатывании под давлением и электроосмосом в устройствах микромасштаба, включая термически развитые потоки и термически развивающиеся потоки. Благодаря минимизированным устройствам микромасштаба вязкая диссипация, в отличие от устройств макромасштаба, больше не может быть тривиально исключена из анализа тепловых характеристик микромасштаба. Более того, эффекты джоулева нагрева также сыграли очень важную роль в анализе обработки теплопередачи, относящейся к микромасштабным электроосмотическим потокам.

В последнее время комбинированный механизм, приводимый в действие электрическим и магнитным полями, широко используется для анализа транспортных характеристик микрожидкостных устройств из-за его многочисленных преимуществ, таких как простота изготовления, отсутствие движущихся частей и низкое рабочее напряжение. Электромагнитная гидродинамика описывает поток жидкости под действием наложенных электрических и магнитных полей, которые могут индуцировать силу Лоренца, толкающую поток жидкости. Средние скорости потока микрожидкостных устройств для перекачивания жидкости могут быть увеличены за счет реализации электромагнитных гидродинамических (ЭМГД) потоков, особенно в магнитном поле малой величины. Следовательно, микронасос ЭМГД, который в основном приводится в действие силой Лоренца, широко используется в биологических и химических областях для управления потоком жидкости. Исследования характеристик движения с помощью микрожидкостных устройств в присутствии электрического и магнитного полей приобрели широкую популярность. В [21] представлен микронасос переменного тока, в котором раствор электролита приводится в действие силой Лоренца. Впоследствии было сообщено о микрожидкостном переключателе, который приводится в движение электромагнитной силой, и поток электролитического раствора может быть перемещен в микрожидкостном контуре Y-образной

формы. Упрощенная двумерная полностью разработанная МГД-модель течения была численно исследована методом конечных разностей. Результаты показали, что на скорость жидкости сильно влияет сила Лоренца, вызванная взаимодействием между электрическим и магнитным полями.

Исследования проводились только на гладких микроканалах, но на практике на поверхности стенки микроканала всегда существует технологическая шероховатость, и жидкость течет под однородным электрическим и магнитным полями по шероховатой стенке. Кроме того, были достигнуты более интересные явления переноса микропотоков, вызванные использованием пространственно неоднородного магнитного поля. В [22] получена приближительная аналитическая скорость ЭМГД через микропараллельный канал, на который действует пространственно изменяющееся неоднородное магнитное поле. Скорости потока сравниваются с численными решениями, полученными методом спектральной коллокации Чебышева. Явления переноса потока жидкости через микропараллельный канал с учетом взаимодействия между двойным электрическим слоем (ДЭС) и наложенными электрическими и магнитными полями изучались в [23].

В [24] исследовалось ЭМГД течение и теплопередача неньютоновской жидкости с учетом эффектов вязкой диссипации и подробно рассмотрены тенденции изменения числа Нуссельта в зависимости от магнитного поля. Эффекты двойного электрического слоя можно учесть при анализе течения ЭМГД. В этом случае механизмы срабатывания потока включают в себя электроосмотическую телесную силу, возникающую в результате эффектов ДЭС, и силу Лоренца, индуцированную взаимодействием между электрическим и магнитным полями.

В практических приложениях ЭМГД характеристики теплопередачи для всех основных аспектов физики на микромасштабе должны подвергаться дальнейшему углубленному изучению с целью разработки эффективных электромагнитных устройств, особенно устройств управления температурой.

Известны практически реализованные электроосмотические насосы, использующиеся в системах охлаждения с принудительной циркуляцией охлаждающей жидкости [25,26]. Электроосмотический насос диаметром 30 мм и толщиной 2 мм обеспечивал перекачку рабочей жидкости 20 мл/мин при напряженности электрического поля на пористой структуре 60 В/мм и развивал давление 0,2 бар при напряжении 100 В, при этом движущиеся детали в системе перекачки жидкости отсутствовали. В качестве рабочей жидкости использовался водный раствор $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$.

Заключение

В литературе отсутствуют упоминания о применении электроосмоса в тепловых трубах, которые уже содержат в своем составе все необходимые элементы — пористый фитиль и рабочую жидкость для создания электроосмотического насоса. Модернизация тепловых труб путем встраивания в них электро-

осмотического насоса позволит избавиться от их основного недостатка — зависимости теплопередачи от положения в пространстве.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-42-530001 р_а.

1. Berrouche Y., Avenas Y., Schaeffer C., et al. Design of a porous electroosmotic pump used in power electronic cooling. *IEEE Trans Ind Appl*, 2009, vol.45(6), pp.2073–2079.
2. Arnold A.K. Numerical modelling of electroosmotic flow through micro-channels. Ph.D. Thesis, 2007, Swansea University.
3. Chai Z., Guo Z., Shi B. Study of electroosmotic flows in microchannels packed with variable porosity media via lattice Boltzmann method. *J Appl Phys*, 2009, vol.101(10), pp.104, 913.
4. Liapis A.I., Grimes B.A. Modeling the velocity field of the electroosmotic flow in charged capillaries and in capillary columns packed with charged particles: interstitial and intraparticle velocities in capillary electrochromatography systems. *J Chromatogr A*, 2000, vol.877(1), pp.181–215.
5. Chapman D.L. Li. A contribution to the theory of electrocapillarity. *London Edinb Dublin Philos Mag J Sci*, 1913, vol. 25(148), pp.475–481.
6. Chen S., He X., Bertola V., et al. Electro-osmosis of non-Newtonian fluids in porous media using lattice Poisson–Boltzmann method. *J Colloid Interface Sci*, 2014, vol.436, pp.186–193.
7. Li B., Zhou W., Yan Y., Han Z., Ren L. Numerical modelling of electroosmotic driven flow in nanoporous media by Lattice Boltzmann method. *J Bionic Eng*, 2013, vol.10(1), pp.90–99.
8. Wang M., Wang J., Chen S., et al. Electrokinetic pumping effects of charged porous media in microchannels using the Lattice Poisson–Boltzmann method. *J Colloid Interface Sci*, 2006, vol.304(1), pp.246–253.
9. Gouy M. Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte. *J Phys Theor Appl*, 1910, vol. 9(1), pp.457–468.
10. Patankar N.A., Hu H.H. Numerical simulation of electroosmotic flow. *Anal Chem*, 1998, vol.70(9), pp.1870–1881.
11. Scales N. Modelling electroosmotic and pressure-driven flow in porous media for microfluidic applications. Ph.D. Thesis, 2004, Ottawa, Carleton University.
12. Tang G., Ye P., Tao W. Pressure-driven and electroosmotic non-Newtonian flows through microporous media via Lattice Boltzmann method. *J Non-Newton Fluid Mech*, 2010, vol.165(21), pp.1536–1542.
13. Kang Y., Yang C., Huang X. Analysis of electroosmotic flow in a microchannel packed with microspheres. *Microfluid and Nanofluidics*, 2005, vol.1(2), pp.168–176.
14. Chen Y.F., Li M.C., Hu Y.H. et al. Low-voltage electroosmotic pumping using porous anodic alumina membranes. *Microfluid and Nanofluidics*, 2008, v.5(2), p.235–244.
15. Kang Y., Tan S.C., Yang C., et al. Electrokinetic pumping using packed microcapillary. *Sens Actuators A Phys*, 2007, vol.133(2), pp.375–382.
16. Yao S., Myers A.M., Posner J.D., et al. Electroosmotic pumps fabricated from porous silicon membranes. *J Micro Electro Mech Syst*, 2006, vol.15(3), pp.717–728.
17. Cheema T., Kim K., Kwak M., et al. Numerical investigation on electroosmotic flow in a porous channel. In: *The 1st IEEE/IAE international conference on intelligent systems and image processing*, 2013, (ICISIP2013), pp.79–82.
18. Pascal J., Oyanader M., Arce P (2012) Effect of capillary geometry on predicting electroosmotic volumetric flowrates in porous or fibrous media. *J Colloid Interface Sci*, vol.378(1), pp.241–250.
19. Wang M. Structure effects on electro-osmosis in microporous media. *J Heat Transf*, 2012, vol.134(5), pp.051,020.
20. Di Fraia S., Massarotti N., Nithiarasu P. Modelling electroosmotic flow in porous media: a review. *International*

- Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, vol.28, is. 2, pp.472 – 497.
21. Lemoff A.V., Lee A.P. An AC magnetohydrodynamic microfluidic switch for micro total analysis systems, Biomed. Microdevices. Biomedical Microdevices, 2003, v.5, p.55–60.
 22. Jian Y.J., J. Su, Chang L., et al. Transient electroosmotic flow of general Maxwell fluids through a slit microchannel. Z. Angew. Math. Phys., 2014, vol.65, pp.435–447. DOI: 10.1007/s00033-013-0341-1
 23. Chakraborty S. Analytical solutions of Nusselt number for thermally fully developed flow in microtubes under a combined action of electroosmotic forces and imposed pressure gradients. Int. J. Heat Mass Transf., 2006, vol.49, pp. 810–813.
 24. Wang P.J., Chang C.Y., Chang M.L. Simulation of two-dimensional fully developed laminar flow for a magnetohydrodynamic (MHD) pump. Biosens. Bioelectron., 2004, vol.20, pp.115–121.
 25. Yao S., Huber D.D., Mikkelsen J., et al. “A Large Flowrate Electroosmotic Pump with Micron Pores”. The International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Sixth Micro-Fluidic Symposium, IMECE2001/MEMS-23890, New York, New York, 2001.
 26. Koo, J., Jiang, L., Bari, A., Zhang, L., Wang, E., Kenny, T.W., Santiago, J.G., Goodson, K.E., “Convective Boiling in Microchannel Heat Sinks with Spatially-Varying Heat Flux”, ITherm 2002, San Diego, CA, USA, May, 2002, p.341-346.