

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 621.565.83:621.396.6

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).815-823

ГРНТИ 55.39.41+47.47

Специальность ВАК 1.3.8

Научная статья

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОСМОСА ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

Петров Р. В., Килиба Ю. В., Захаров М. А., Эминов С. И.

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого
(Великий Новгород, Россия)*

Аннотация Статья посвящена исследованию проблемы применения электроосмоса в пористых и капиллярных системах тепловых труб, предназначенных для использования в системах охлаждения радиоаппаратуры. Использование электроосмоса в тепловых трубах уменьшит гравитационную зависимость теплового сопротивления тепловой трубы и позволит контролировать ее производительность. В статье представлены результаты практической реализации электроосмотических насосов, используемых в системах охлаждения. В заключении рассмотрены перспективы использования электроосмоса в тепловых трубах.

Ключевые слова: электроосмос, тепловые трубы, системы охлаждения

Для цитирования: Петров Р. В., Килиба Ю. В., Захаров М. А., Эминов С. И. Исследование электрического осмоса для тепловых труб // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 815-823. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).815-823

Research Article

INVESTIGATION OF ELECTRIC OSMOSIS FOR HEAT PIPES

Petrov R. V., Kiliba Yu. V., Zakharov M. A., Eminov S. I.

Yaroslav-the-Wise Novgorod State University (Veliky Novgorod, Russia)

Annotation The article is devoted to the study of the problem of the electroosmosis application in porous and capillary systems of heat pipes intended for use in cooling systems of radio equipment. The use of electroosmosis in heat pipes will reduce the gravitational dependence of thermal resistance of a heat pipe and will allow you to control its performance. The article presents the results of the practical implementation of electroosmotic pumps used in cooling systems. In conclusion, the prospects of using electroosmosis in heat pipes are considered.

Keywords: electroosmosis, heat pipes, cooling systems

For citation: Petrov R. V., Kiliba Yu. V., Zakharov M. A., Eminov S. I. Investigation of electric osmosis for heat pipes // Vestnik NovSU. 2023. 5(134). 815-823. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).815-823

Введение

Радиоэлектронная аппаратура, энергетические установки, автоматические комплексы и прочие инженерные разработки практически всегда требуют больших энергетических затрат. Значительная энергетическая мощность таких систем и комплексов, требует определённых инженерных методов по отводу тепла от теплонагруженных элементов конструкции. Одним из таких методов, который широко применяют на практике в настоящее время в сочетании с принудительно обдуваемым радиатором, является быстрый отвод тепла из опасной тепловой зоны

с использованием тепловых труб. Увеличение надёжности работы радиоэлектронных систем и комплексов в целом, повышение эффективности применяемых полупроводниковых приборов, необходимость непрерывной работы может быть обеспечена с использованием средств для охлаждения опасных зон перегрева в устройствах, например, таких как тепловые трубы.

Тепловую трубу можно рассматривать как конструктивный элемент системы охлаждения. Принцип действия их основан на явлениях фазовых переходов (кипение, испарение, конденсация) теплоносителя, помещенного в трубу. Например, в закрытых металлических трубах, выполненных из теплопроводящего металла, может находиться легкокипящая жидкость [1]. В этом случае при нагреве одной из сторон, так называемой зоны испарения тепловой трубы, в которой происходит кипение жидкости и далее испарение, теплоноситель в виде пара переносится в зону охлаждения. Пар движется по нейтральной зоне в сторону холодной стороны трубы в зону конденсации. Здесь он конденсируется, опять превращаясь в жидкость и стекая обратно в зону испарения по фитилю. Увеличение эффективности работы тепловых труб возможно достигнуть с помощью применения эффекта электрического осмоса [2]. Статья посвящена рассмотрению принципа действия и возможности применения на практике электрического осмоса в тепловых трубах для охлаждения в том числе и радиоэлектронной аппаратуры.

Электрический осмос в тепловых трубах

Тепловые трубы известны как высокоэффективные проводники тепла. Теплопроводность тепловой трубы превышает в 100 раз теплопроводность металлического прутка, площадь поперечного сечения которого равна площади поперечного сечения такой тепловой трубы. Еще одно достоинство тепловых труб заключается в отсутствии движущихся и изнашивающихся элементов, что определяет их высокую надежность при правильном расчете с учетом условий эксплуатации и соблюдении технологии производства.

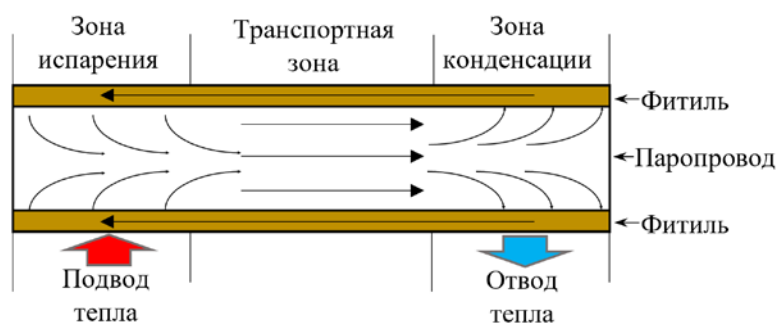


Рисунок 1. Принцип функционирования тепловой трубы

На рисунке 1 показан разрез тепловой трубы. Она состоит из герметичного корпуса из теплопроводящего материала. На внутренней поверхности корпуса с обеспечением теплового контакта с корпусом размещён фитиль. Внутри трубы после

удаления воздуха залит теплоноситель, при этом фитиль должен быть насыщен теплоносителем и допускается небольшой избыток теплоносителя в зоне испарения.

При подводе тепловой энергии в зону испарения жидкий теплоноситель испаряется с поверхности фитиля. Пар из-за разности давлений между зоной испарения и зоной конденсации теплоносителя по паропроводу движется в зону конденсации через транспортную зону, которая не участвует в теплообмене. Температура в зоне конденсации ниже температуры пара, что приводит к конденсации паров теплоносителя на поверхности фитиля в зоне конденсации. Таким образом, в зоне конденсации в фитиле возникает избыток теплоносителя, а в зоне испарения количество жидкости в фитиле из-за испарения уменьшается. Благодаря капиллярному напору и градиенту количества теплоносителя в фитиле жидкий теплоноситель движется из зоны конденсации в зону испарения.

Для повышения эффективности работы тепловой трубы необходимо выбирать теплоноситель химически нейтральный к материалам корпуса и фитиля, жидкость должна смачивать фитиль. Плотность насыщенных паров теплоносителя, давление насыщенного пара теплоносителя и скрытая теплота парообразования должны иметь максимальные значения, а вязкость теплоносителя в диапазоне рабочих температур тепловой трубы должна иметь минимальное значение.

Для температурных границ работы электронной аппаратуры оптимальными теплоносителями являются: аммиак, вода, спирты и ацетон. Материалы для изготовления корпуса тепловой трубы: медь, алюминий, керамика. Известны оптимальные пары теплоносителя и материала тепловой трубы [3], например: медь-вода, аммиак-алюминий, ацетон-алюминий, спирт-алюминий.

Но тепловые трубы обладают одним существенным недостатком – гравитационной зависимостью. На рисунке 2 а показано нормальное рабочее положение тепловой трубы в условиях гравитации: жидкий теплоноситель под воздействием гравитации и капиллярных сил перемещается в зону испарения. Например, экспериментально установлено, что для нормальной работы тепловой трубы диаметром 12 мм алюминий-аммиак с артериальным фитилем угол α должен находиться в диапазоне от 3^0 до 177^0 [4], то есть зона испарения должна располагаться ниже зоны конденсации. На рисунке 2 б показано «неправильное» положение тепловой трубы, в котором она полностью неработоспособна, либо передаваемая ею мощность падает до уровня 1...2% от номинала [4]. Жидкий теплоноситель под действием гравитации скапливается в зоне конденсации, при этом происходит осушение фитиля в зоне испарения, что приводит к неработоспособности тепловой трубы в случае, когда зона испарения находится выше зоны конденсации. Как правило неправильное положение тепловой трубы может возникнуть при эксплуатации переносной аппаратуры, либо аппаратуры, устанавливаемой на транспортных средствах.

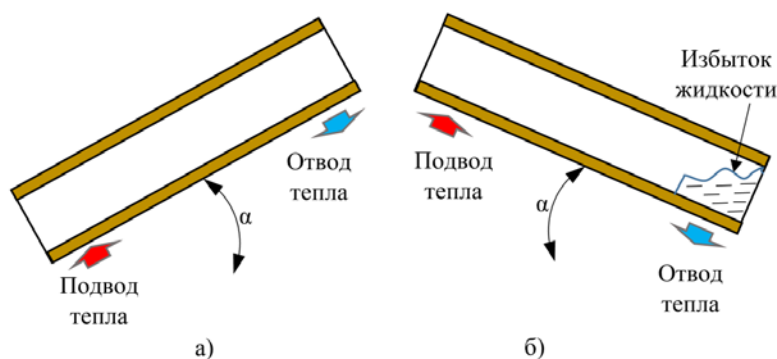


Рисунок 2. Гравитационная зависимость тепловой трубы: а) рабочее положение тепловой трубы, б) тепловая труба неработоспособна

Для устранения либо уменьшения гравитационной зависимости тепловой трубы предлагается в конструкцию классической тепловой трубы ввести насос, что позволит уменьшить, или совсем устранить влияние гравитации на производительность тепловой трубы. В основе такого насоса может быть явление электрического осмоса, заключающееся в прохождении жидкости через капилляры под воздействием внешнего электрического поля [5].

Явление электроосмоса используется в различных областях, таких как химия, медицина, геофизика, энергетика. К ним относятся: капиллярная электрохроматография [6], дренирование и регенерация [7], откачка [8]. Электроосмотическое течение описывается простой моделью профиля скорости жидкости, а отсутствие движущихся частей, простота реализации и эксплуатации обеспечивают высокую повторяемость и надежность [5].

Механизм действия электроосмоса заключается в возникновении двойного электрического слоя. При контакте нерастворимого материала стенки с жидкостью происходит диссоциация ионов, внутренняя обкладка двойного электрического слоя образуется на стенке, а ионы противоположного знака располагаются в диффузионном слое жидкости, что объясняется ионизацией поверхностных молекул твердых частиц либо избирательной адсорбцией поверхностью частиц одного из ионов электролита, находящегося в растворе (рисунок 3). При этом заряд на стенке и заряд жидкости имеют противоположные знаки, но одинаковы по абсолютной величине. Двойной электрический слой представляется в виде плоского конденсатора, одна обкладка которого стенка, а вторая обкладка жидкость. Толщина такого конденсатора равна радиусу потенциалопределяющих ионов.

На рисунке 3 показан разрез капилляра. При приложении внешнего напряжения от источника питания 5, возникает электрическое поле, направленное вдоль стенки, ионы, располагающиеся в диффузионном слое жидкости 2 начинают двигаться к противоположно заряженному электроду. Движение ионов вдоль стенки вызывает в свою очередь движение жидкости в пограничной области по всему периметру капилляра 3, и за счет вязкого трения начинает двигаться весь объем жидкости 4, находящейся в капилляре, при этом чем больше напряженность

электрического поля, чем больше толщина диффузионного слоя и чем меньше диаметр капилляра, тем интенсивнее будет происходить электроосмотический перенос жидкости.

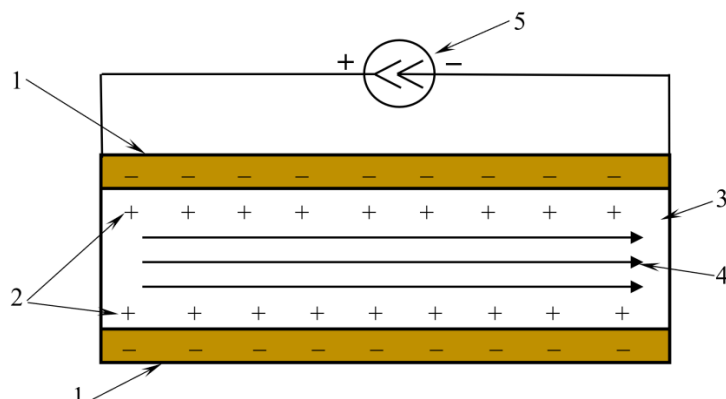


Рисунок 3. Возникновение двойного электрического слоя и движение жидкости в капилляре под действием внешнего электрического поля. 1. Стенка. 2. Диффузионный слой. 3. Капилляр. 4. Поток жидкости в капилляре. 5. Источник питания

Электрический осмос описывается уравнением Гельмгольца-Смолуховского (1), которое описывает скорость дисперсной среды под влиянием приложенного электрического поля.

$$V = \frac{\xi \times \varepsilon \times \varepsilon_0 \times E_{\text{вн}}}{\eta}, \quad (1)$$

где: ξ – электрокинетический потенциал,

ε – диэлектрическая проницаемость среды,

ε_0 – электрическая постоянная: $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м,

$E_{\text{вн}}$ – разность потенциалов на концах капилляра,

η – вязкость среды.

Зная скорость движения жидкости по капилляру можно рассчитать такие важные для электроосмотического насоса параметры, как расход жидкости, давление и их зависимость от приложенного напряжения.

Также электроосмотическое течение в микро- и наносистемах теоретически изучалось методами численного моделирования. Внутренний потенциал для плоской поверхности описывается уравнением Пуассона, которое можно линеаризовать при малых значениях электрического потенциала с помощью приближения Дебая–Хюккеля. Из-за малых размеров микроканалов получение экспериментальных данных обычно затруднено. Фитиль тепловой трубы, по которому движется жидкий теплоноситель, представляет собой пористую среду, что позволит применить результаты исследований электроосмотического течения для расчета фитиля не только по капиллярному давлению и силе тяжести, но и для учета электроосмотического давления. Для практического применения основной интерес при расчете электроосмотических насосов представляют следующие два параметра: массовый расход жидкого теплоносителя в единицу времени, что даёт

оценку возможности насоса при транспортировке тепловой энергии и давление жидкости на выходе насоса, что позволяет оценить возможности насоса по преодолению гидравлического сопротивления всей системы охлаждения.

Наиболее эффективным для формирования электроосмотического потока является комбинированный механизм, заключающийся в одновременном действии электрического и магнитного полей на электропроводящую жидкость. Электромагнитная гидродинамика описывает поток жидкости, на который воздействует электрическое и магнитное поле, индуцирующее силу Лоренца. Средняя скорость электромагнитных гидродинамических течений в микроканальных насосах может быть увеличена за счет воздействия слабого магнитного поля. Известен микронасос переменного тока, в котором раствор электролита приводится в движение силой Лоренца.

Тепловая труба с электроосмотическим насосом представлена на рисунке 4. При наклоне тепловой трубы 1 таким образом, что зона испарения будет находиться выше зоны конденсации, в зоне конденсации начнет скапливаться жидкий теплоноситель 2. Через подводящую трубку 3 жидким теплоносителем заполняется корпус электроосмотического насоса 5, и пористая структура 6. При подаче напряжения от источника питания 7 на пористую структуру 6, пропитанную жидким теплоносителем, жидкость через отводящую трубку 4 будет подаваться в зону испарения тепловой трубы 1. Таким образом, работоспособность тепловой трубы будет поддерживаться непрерывно.

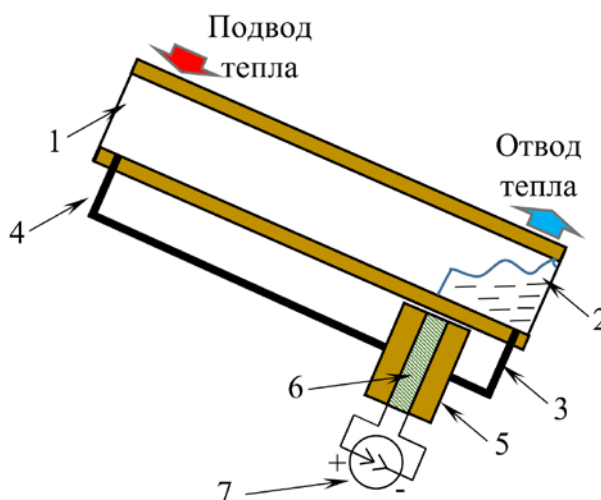


Рисунок 4. Тепловая труба с электроосмотическим насосом. 1. Тепловая труба. 2. Жидкость в зоне конденсации. 3. Подводящая трубка. 4. Отводящая трубка. 5. Электроосмотический насос. 6. Пористая структура. 7. Источник питания

Напряжение на пористую структуру может подаваться постоянно, что избавит от необходимости отслеживать положение тепловой трубы в пространстве. При заполнении пористой структуры жидкостью начнет работать электроосмотический насос, при отсутствии жидкости в пористой структуре работа по перемещению

жидкости выполняться не будет, и, соответственно, не будет потребления тока от источника питания.

В [6] описана жидкостная система охлаждения с электроосмотическим насосом. Производительность насоса, основанного на пористой структуре из стекла с порами 1 мкм диаметром 30 мм и толщиной 2 мм, составляла 0,02 литра/мин, при давлении на выходе 30 кПа и при напряженности электрического поля 60 В/мм. Перегрев охлаждающей жидкости в системе охлаждения составлял 60 °С. С учетом теплоемкости воды 4,18 кДж/кг электроосмотический насос обеспечивал отвод 5 кДж в минуту. Если такой-же насос будет работать с тепловой трубой, то с учетом нагрева воды до состояния кипения и полного испарения жидкости, количество теплоты парообразования для воды составляет 2258 кДж/кг, то система электроосмотический насос-тепловая труба обеспечит отвод тепловой энергии 50 кДж в минуту, что в десять раз превышает возможности жидкостной системы охлаждения с теми же энергозатратами.

Тепловые трубы уже давно не являются экзотикой, применяемой только в космической и военной технике. Например, сейчас тепловые трубы медь-вода в широко используются в компьютерной технике, они имеют малую длину и капиллярный напор фитильной структуры позволяет противодействовать гравитации. Но при увеличении длины тепловых труб начинает проявляться гравитационная зависимость, применение электроосмотических насосов позволит устранить снижение их тепловой производительности. Хотя при этом теряется главное достоинство тепловой трубы: отсутствие какого-либо питания, труба работает за счет тепловой энергии, которую необходимо отвести от тепловыделяющих элементов. Высокая эффективность систем охлаждения, основанных на цикле испарение-конденсация, превосходящая в 10 раз обычные жидкостные системы охлаждения и позволяет надеяться, что тепловые трубы с электроосмотическим насосом займут свою нишу во всем многообразии охлаждающих систем. Дальнейшее развитие тепловых труб с электроосмотическим насосом видится как гибрид кольцевой системы охлаждения с разделенными гладкими трубопроводами для жидкой и парообразной фаз теплоносителя, испарителем и конденсатором, которые содержат фитильную структуру не для транспортировки теплоносителя, а для увеличения площади испарения и конденсации.

Заключение

Статья посвящена исследованию проблемы применения электроосмоса в пористых и капиллярных системах тепловых труб предназначенных для использования в системах охлаждения радиоаппаратуры. Использование электроосмоса в тепловых трубах уменьшит гравитационную зависимость теплового сопротивления тепловой трубы и позволит контролировать ее производительность. Тепловые трубы сейчас широко используются в компьютерных технологиях, а не

только в космической и военной технике. Например, медно-водяные тепловые трубки сейчас широко используются в ноутбуках, они имеют небольшую длину, а капиллярное давление фитильной структуры позволяет противодействовать силе тяжести. Но гравитационная зависимость начинает проявляться с увеличением длины тепловых труб. Использование электроосмотических насосов устранило снижение их тепловых характеристик. Хотя в этом случае теряется главное преимущество тепловой трубы – отсутствие какого-либо источника питания, труба работает только за счет тепловой энергии, которую необходимо отводить от тепловыделяющих элементов. Высокая эффективность систем охлаждения, основанных на цикле испарения-конденсации, которая в 10 раз выше, чем у обычных систем жидкостного охлаждения, позволяет предположить, что тепловые трубки с электроосмотическим насосом займут определенную коммерческую нишу. Дальнейшее развитие тепловых труб с электроосмотическим насосом предполагается как гибридная кольцевая система охлаждения с разделенными гладкими трубопроводами для жидкой и паровой фаз хладагента, испарителя и конденсатора, которые содержат фитильную конструкцию не для транспортировки хладагента, а для увеличения площади испарения и конденсации.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-10187, <https://rscf.ru/project/23-29-10187/>).

Список литературы

1. Сергеев И. С., Белов И. А., Быстрова А. Г., Петров Р. В. Лабораторная технология изготовления тепловых труб для источников вторичного электропитания с повышенным КПД // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. Серия. Технические науки. 2020. №2(118). 56-61. DOI: 10.34680/2076-8052.2020.2(118).56-61
2. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. Москва: Физматгиз, 1959. 699 с.
3. Дан П. Д., Рей Д. А. Тепловые трубы / перевод с английского Ю. А. Зейгарника. Москва: Энергия, 1979. 271 с. (Перевод издания: Dunn, P. D. Heat pipes / P. D. Dunn, D. A. Reay. Pergamon Press, Oxford-New York-Toronto-Sydney- Paris-Braunschweig, 1976).
4. Ивановский М. Н., Сорокин В. П. Физические основы тепловых труб. Москва: Атомиздат 1978. 256 с.
5. Килиба Ю. В., Киселев В. А., Петров Р. В., Татаренко А. С. Электрический осмос в тепловых трубах // Вестник НовГУ. 2021. 2(123). 27-30. DOI: 10.34680/2076-8052.2021.2(123).27-30
6. 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 // Journal of Chromatography A. 2000. 877(1). 181-215. DOI: 10.1016/S0021-9673(00)00185-0
7. Chapman D. L. Li. A contribution to the theory of electrocapillarity // The London Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1913. 25(148). 475-481. DOI: 10.1080/14786440408634187

8. Berrouche Y., Avenas Y., Schaeffer C., Chang H. C., Wang P. Design of a porous electroosmotic pump used in power electronic cooling // IEEE Transactions on Industry Applications. 2009. 45(6). 2073-2079. DOI: 10.1109/TIA.2009.2031934

References

1. Sergeev I.S., Belov I.A., Bystrova A.G., Petrov R.V. Laboratornaia tekhnologiya izgotovleniya teplovykh trub dlia istochnikov vtorichnogo elektropitaniia s povyshennym KPD [Laboratory technology for manufacturing heat pipes for secondary power sources with increased efficiency] // Vestnik NovSU. 2020. 2(118). 56-61. DOI: 10.34680/2076-8052.2020.2(118).56-61

2. Levich V. G. Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika [Physico-chemical hydrodynamics]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1959. 699 p.

3. Dunn P. D., Reay D. A. Heat pipes. Pergamon Press, Oxford-New York-Toronto-Sydney-Paris-Braunschweig, 1976. (Russ. ed.: Dan P. D., Reay D. A. Teplovyte trubyy. Moscow, Energiya Publ., 1979. 271 p.)

4. Ivanovsky M. N., Sorokin V. P. Fizicheskie osnovy teplovykh trub [Physical foundations of heat pipes]. Moscow, Atomizdat Publ., 1978. 256 p.

5. Kiliba Yu. V., Kiselev V. A., Petrov R. V., Tatarenko A. S. Elektricheskii osmos v teplovykh trubakh [Electroosmosis in heat pipes] // Vestnik NovSU. 2021. 2(123). 27-30. DOI: 10.34680/2076-8052.2021.2(123).27-30

6. 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 // Journal of Chromatography A. 2000. 877(1). 181-215. DOI: 10.1016/S0021-9673(00)00185-0

7. Chapman D. L. Li. A contribution to the theory of electrocapillarity // The London Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1913. 25(148). 475-481. DOI: 10.1080/14786440408634187

8. Berrouche Y., Avenas Y., Schaeffer C., Chang H. C., Wang P. Design of a porous electroosmotic pump used in power electronic cooling // IEEE Transactions on Industry Applications. 2009. 45(6). 2073-2079. DOI: 10.1109/TIA.2009.2031934

Информация об авторах

Петров Роман Валерьевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, главный научный сотрудник, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-9751-116X, Roman.Petrov@novsu.ru

Килиба Юрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-7660-6039, Yury.Kiliba@novsu.ru

Захаров Максим Анатольевич – доктор физико-математических наук, доцент, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0002-9144-340X, Maxim.Zakharov@novsu.ru

Эминов Стефан Ильич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого (Великий Новгород, Россия), ORCID: 0000-0001-9497-8234, Stefan.Eminov@novsu.ru