

УДК 624

Исследование методов уменьшения термического сопротивления составного термостабилизатора*

Ю.А. Кузма-Кичта¹, Н.С. Иванов¹, А.В. Лавриков¹,
Ю.П. Штефанов², И.Ф. Прокопенко²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия

² ООО «НьюФрост», Московская область, г. Протвино, 142280, Россия

e-mail: kuzma@itf.mpei.ac.ru; ivanov.mpei@mail.ru

DOI: 10.34759/TPP-2019-11-10-447-452

Поступила в редакцию 24.09.2019

После доработки 03.10.2019

Принята к публикации 04. 10.2019

Исследованы термическое сопротивление составного термостабилизатора и методы его уменьшения. Установлено, что термическое сопротивление термостабилизатора снижается за счет нанесения микропористого покрытия на поверхность испарителя тепловой трубы. В работе разработан метод получения наночастиц оксида алюминия, измерена высота капиллярного поднятия жидкости в покрытии и проведена оценка стабильности свойств покрытия. Получены зависимости термического сопротивления и температурного напора от передаваемого теплового потока для моделей термостабилизаторов из стали и алюминия, без стыка и со стыком.

Ключевые слова: термостабилизатор, наночастицы, тепломассообмен, смачиваемость, термическое сопротивление, нанопокрyтия, интенсификация теплообмена.

Введение

В настоящее время при строительстве протяженных объектов в регионах вечной мерзлоты термостабилизация грунта с использованием длинных тепловых труб затруднена и поэтому осуществляется с помощью составных термостабилизаторов [1]. На термическое сопротивление составного термостабилизатора оказывает влияние стык тепловых труб, структура поверхности испарителя, материал труб, теплоноситель и ориентация [1–3].

В работах [4–7] для снижения термического сопротивления на поверхность испарителя термостабилизатора наносились наночастицы оксида алюминия. Установлено, что нанесение микропористых покрытий позволяет снизить термическое сопротивление на 10–15%. Показано, что покрытия из наночастиц и проволоки

улучшают теплообмен и снижают термическое сопротивление модели слабонаклонного термостабилизатора.

В работах [7–9] исследовано влияние нано- и микропористых покрытий на коэффициент теплоотдачи в испарителе вертикальной тепловой трубы, заполненной водой. Установлено, что нанесение пористых покрытий на участок испарения позволяет повысить коэффициент теплоотдачи до трех раз.

В работе [10] исследовано влияние на теплоотдачу в испарителе тепловой трубы микроструктуры в виде резервуарных впадин для различных жидкостей: ацетон, пентан и аммиак. Установлено, что резервуарные впадины приводят к росту теплоотдачи при кипении в два раза. В работах [11, 12] исследовано влияние микроструктуры поверхности тепловой трубы на термическое сопротивление. Установлено, что применение микроструктур в виде резервуарных впадин снижает термическое сопротивление. Проведена оценка стабильности тепло-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 19-08-01109.

вых труб, разработан специальный тест для оценки надежности термосифонов [13].

Однако имеющиеся данные по термическому сопротивлению тепловых труб крайне ограничены. В настоящей работе представлен метод получения наночастиц оксида алюминия и исследованы характеристики покрытия, сформированного с помощью наночастиц оксида алюминия, а также получены данные по термическому сопротивлению различных моделей термостабилизаторов.

Метод формирования слоя наночастиц в зоне кипения тепловой трубы

Для формирования микропористых покрытий разработан метод получения наночастиц оксида алюминия, основанный на термическом разло-

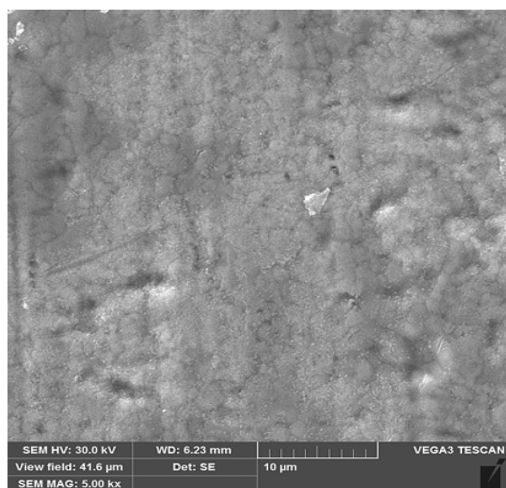


Рис. 1. Слой наночастиц оксида алюминия на поверхности никеля

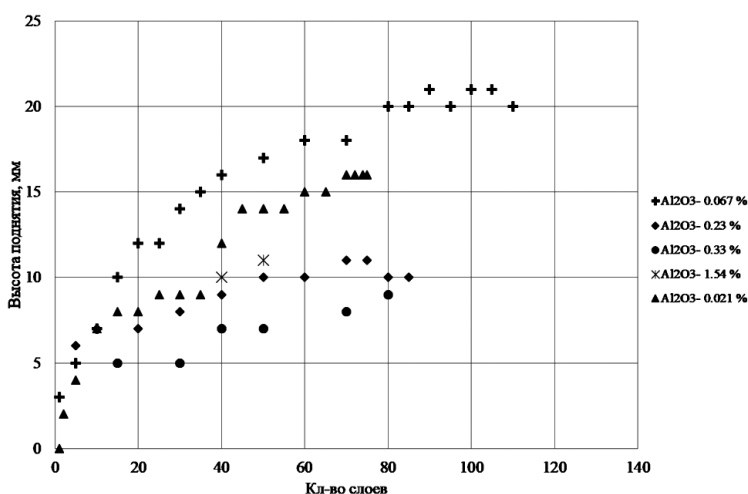


Рис. 2. Зависимость высоты капиллярного поднятия жидкости от количества слоев частиц

жении дисперсной смеси из целлюлозы и сульфата алюминия [14–16]. Проводилось исследование покрытий из наночастиц, полученных при 950, 1000 и 1100 °С. Установлено, что при увеличении температуры термического разложения характерный размер частиц уменьшается.

Слой наночастиц оксида алюминия (рис. 1) формировался при кипении коллоидного раствора воды и наночастиц оксида алюминия на поверхности никелевой подложки. Высота капиллярного поднятия жидкости в слое наночастиц равна 15 мм. Слой наночастиц сохраняет транспортные свойства в течение ограниченного времени.

Для оценки стабильности покрытия из наночастиц оксида алюминия, полученных при разной температуре разложения, измерялось изменение высоты капиллярного поднятия жидкости от количества слоев наночастиц и их концентрации. Как видно на рис. 2, с увеличением количества слоев наночастиц высота капиллярного поднятия растет. Обнаружена оптимальная концентрация наночастиц в растворе, для которой получена наибольшее значение высоты капиллярного поднятия.

Метод измерения термического сопротивления составного термостабилизатора

Методика измерения термического сопротивления заключается в определении передаваемого теплового потока от холодильной машины через датчики теплового потока к конденсатору тепловой трубы и измерении разницы температуры между испарителем и конденсатором тепловой трубы. После чего термическое сопротивление рассчитывается по формуле

$$R = \frac{\Delta T}{Q}$$

Для исследования термического сопротивления вертикального составного термостабилизатора была разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 3. Установка состоит из холодильного контура, включающего в себя: пароперегреватель 1, компрессор 2, конденсатор 3, запорный вентиль 4, дросселирующее устрой-

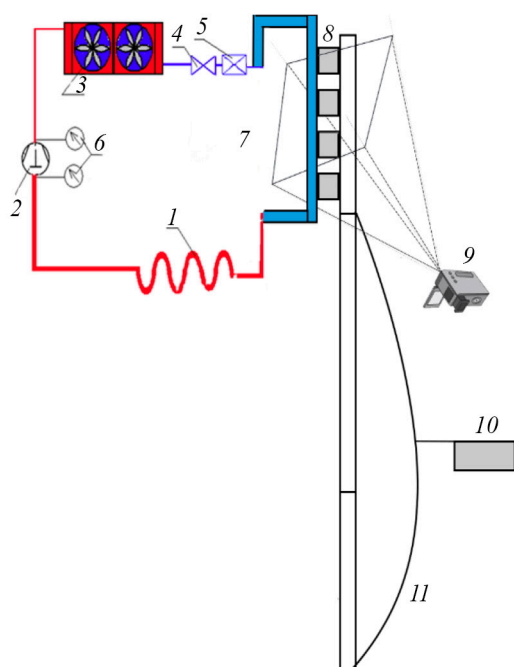


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

ство 5, отборы давления 6 и зону испарения 7, соединенную с тепловой трубой с помощью датчиков теплового потока 8. Датчик теплового потока состоит из двух металлических пластин, соединенных тонкой медной вставкой. На каждой пластине датчика теплового потока проводилась средняя линия, по которой измерялась температура горячей и холодной стороны датчика. Через датчик проходит тепловой поток от испарителя холодильной установки к конденсатору модели тепловой трубы. Перед проведением эксперимента для каждого датчика проводилась тарировка. Тепловизор 9 фиксирует перепад температуры на поверхности датчика, что позволяет определить тепловой поток. Разница температуры между испарителем и конденсатором измеряется дифференциальной термопарой и регистрируется мультиметром 10 и дифференциальной термопарой 11. Холодильная установка обеспечивала мощность 800 Вт. В зоне конденсации каждый спай термопары закреплялся между тепловой трубой и датчиком теплового потока, а в зоне испарения концы термопары закреплялись с помощью алюминиевой ленты. Нарастание инея и появление конденсата на поверхности датчиков теплового потока вносят погрешность в измерение температуры тепловизором. Эту погрешность определяли в специальных опытах, и для уменьшения ее влияния перед каждым из-

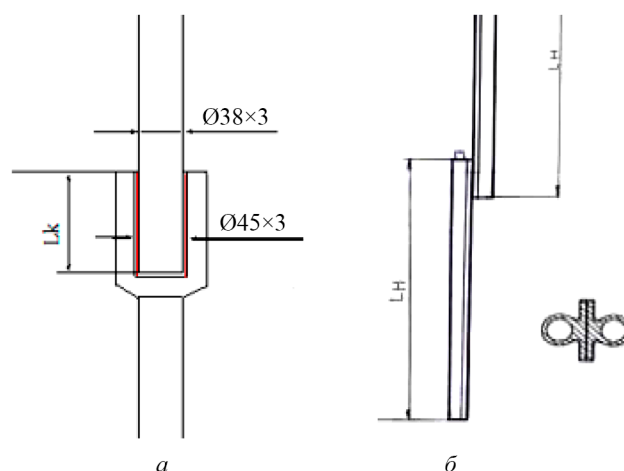


Рис. 4. Схемы выполнения стыка в составном термостабилизаторе: а – труба в трубе; б – плоская полка

мерением поверхность очищалась от инея и конденсата. Для обеспечения корректности измерений телевизором Guide MOBIR M8 разнородных поверхностей все элементы покрывались одинаковой черной краской. Данная краска использовалась при калибровке тепловизора по степени черноты. Тепловые трубы моделей термостабилизатора были изготовлены из стали и алюминия.

На рис. 4 приведены схемы выполнения стыка в составном термостабилизаторе.

Термическое сопротивление модели термостабилизатора

В составном алюминиевом термостабилизаторе корпус выполнен с плоской полкой, по которой происходит соединение. В составном стальном термостабилизаторе стык происходит как «труба в трубе» – труба $\text{Ø}38 \times 3$ входит в трубу $\text{Ø}45 \times 3$ с зазором 0.5 мм. Характеристики труб приведены в таблице.

Характеристики труб термостабилизатора

№	Материал	Диаметр трубы и толщина стенки, мм	Теплоноситель	Стык
1	Сталь 20	$\text{Ø}38 \times 3$	Фреон R22	Нет
2	Сталь 20	$\text{Ø}38 \times 3$ – вн. $\text{Ø}45 \times 3$ – нар.	Фреон R22	«Труба в трубе» (рис. 4, а)
3	Алюминий	$\text{Ø}38 \times 3$	Фреон R22	Нет
4	Алюминий	$\text{Ø}38 \times 3$	Фреон R22	«Плоская полка» (рис. 4, б)

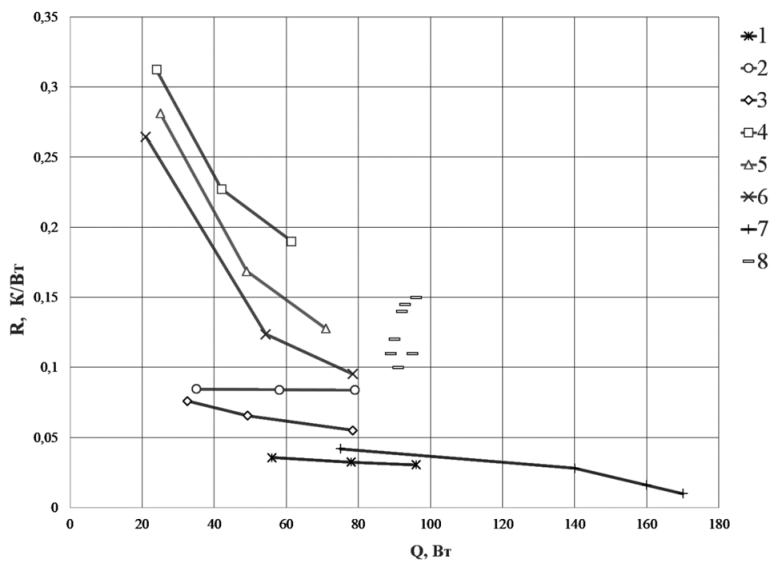


Рис. 5. Термическое сопротивление различных моделей тепловых труб: 1 – для трубы из алюминия без стыка; 2 – при стыковке двух труб по схеме «плоская полка»; 3 – труба из стали без стыка; 4 – труба из стали со стыком, заполненным воздухом; 5 – труба из стали со стыком, заполненным водой; 6 – труба из стали со стыком, заполненным термопастой; 7 – труба из стали с нанесением на испаритель наночастиц оксида алюминия (ориентация – вертикальная); 8 – труба из стали с нанесением на испаритель наночастиц оксида алюминия (ориентация – горизонтальная)

С помощью разработанной универсальной установки для измерения термического сопротивления моделей термостабилизатора были получены экспериментальные данные для стальных и алюминиевых труб без стыка, со стыками труба в трубе и по схеме «плоская полка». В месте стыка наблюдалось увеличение температуры поверхности трубы, вызванное ростом термического сопротивления.

Полученные данные по термическому сопротивлению для исследованных моделей термостабилизаторов показаны на рис. 5. Наименьшее термическое сопротивление установлено для трубы из алюминия без стыка (точки 1) и при стыковке двух труб по схеме «плоская полка» (точки 2), а также для модели из стали с покрытием испарителя наночастицами оксида алюминия. Модели из стали имеют более высокое термическое сопротивление как без стыка (точки 3), так и со стыком, заполненным воздухом, водой и термопастой (точки 4–6) соответственно. При нанесении на испаритель наночастиц оксида алюминия, его термическое сопротивление уменьшается (точки 7), а при изменении ориентации стальной трубы от вертикальной до горизонтальной – возрастает (точки 8).

Выводы

1. В работе предложен метод формирования слоя наночастиц в зоне кипения тепловой трубы [15].

2. Проведено исследование высоты капиллярного поднятия жидкости для оценки стабильности покрытия из наночастиц оксида алюминия.

3. Получены данные по термическому сопротивлению исследованных моделей термосифонов. Установлены зависимости термического сопротивления вертикальных моделей термосифонов от передаваемого теплового потока для следующих вариантов: стальные трубы со стыком, выполненным в виде труба в трубе, сухого и заполненного водой или пастой LOCTITE SI 100, трубы из алюминия без стыка и сухим плоским стыком.

4. Наименьшее термическое сопротивление имеют модели тепловых труб из алюминия со стыком или без него и стали с нанесением на поверхность испарителя покрытием из наночастиц оксида алюминия. Модели из стали без покрытия имеют более высокое термическое сопротивление как без стыка, так и со стыком, заполненным воздухом, водой или термопастой. При нанесении на испаритель наночастиц оксида алюминия термическое сопротивление уменьшается, а при изменении вертикальной ориентации стальной трубы на горизонтальную возрастает.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Н.С., Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В. Исследование термического сопротивления составного термостабилизатора // Тезисы докладов XXII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках». 20–24 мая 2019 г., Москва. М.: Печатный салон «Шанс», 2019. Т. 2. С. 109.
2. Иванов Н.С., Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В. Исследование влияния слоя из наночастиц в испарителе на термическое сопротивление термостабилизатора // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: XXIII науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (15–16 марта 2018 г., Москва): Тез. докл. М.: ООО «Центр полиграфических услуг „Радуга“», 2018. С. 784.

3. **Dzyubenko V.V., Kuzma-Kichta Ya. A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P.** Intensification of Heat and Mass Transfer on Macro-, Micro-, and Nanoscales. Begell House Publishers Inc., США. 2017. 630 с.
4. **Лавриков А.В., Штефанов Ю.П., Прокопенко И.Ф., Жуков В.М., Кузма-Кичта Ю.А., Шустов М.В., Степина Н.А., Левашов Ю.А.** Investigation of heat transfer enhancement and thermal resistance of weakly inclined thermostabilizer // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. V. 891, conf. 1. P. 012150. DOI:10.1088/1742-6596/891/1/012150
5. **Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В., Штефанов Ю.П., Прокопенко И.Ф., Левашов Ю.М.** Исследование транспортных свойств испарителя модели термостабилизатора с различной структурой поверхности // *Тепловые процессы в технике*. 2016. Т. 8. № 9. С. 395–400.
6. **Khodabandeh R., Furberg R.** Heat transfer, flow regime and instability of a nano- and micro-porous structure evaporator in a two-phase thermosyphon loop // *International Journal of Thermal Sciences*. 2010. V. 49. P. 1183–1192. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.01.016>
7. **Vipul M. Patell, Telli Srinivasa R., Hemantkumar B. Mehta.** Effect of water based CuO nanofluid on startup mechanism and thermal performance of a closed loop pulsating heat pipe // *Joint 19th IHPC and 13th IHPS, Pisa, Italy*, June 10–14, 2018.
8. **Sacua K., Buitrago-Sierra R., Herrera B., Gallego A., Pabón E.** Surfactant effect in the thermal performance of a two-phase thermosyphon using Al₂O₃ nanofluid // *Joint 19th IHPC and 13th IHPS, Pisa, Italy*, June 10–14, 2018.
9. **Betancur C.L., Mangini D., Facin A., Mantelli M., Paiva K., Coutinho B., Marengo M.** Experimental study of start-up in a closed loop pulsating heat pipe with alternating superhydrophobic channels // *Joint 19th IHPC and 13th IHPS, Pisa, Italy*, June 10–14, 2018.
10. **Pis'mennyi E.N., Khayrnasov S.M., Rassamakina B.M.** Heat transfer in the evaporation zone of aluminum grooved heat pipes // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 127. Part C. December 2018. P. 80–88.
11. **Vlassov V., Bertoldo J. Junior, Nadjara dos Santos.** A comparative study of performance of heat pipes with rectangular and omega-type grooves // *Joint 19th IHPC and 13th IHPS, Pisa, Italy*, June 10–14, 2018.
12. **Bellani P., Milanez F., Mantelli M., Filippeschi S., Mameli M., Fantozzi F.** Theoretical and experimental analyses of the thermal resistance of a loop thermosyphon for passive solar heating of buildings // *Joint 19th IHPC and 13th IHPS, Pisa, Italy*, June 10–14, 2018.
13. **Dashti I., Asghari S., Abedi M., Sheida M.** Practical method for operating and durability tests of Heat Pipe based on using vacuum chamber // *Joint 19th IHPC and 13th IHPS, Pisa, Italy*, June 10–14, 2018.
14. **Иванов Н.С., Лавриков А.В., Кузма-Кичта Ю.А., Устинов А.А., Жуков В.М.** Исследование механизма образования слоя из наночастиц при испарении коллоидного раствора // Тезисы докладов Юбилейной конференции Национального комитета РАН по тепло- и массообмену «Фундаментальные и прикладные проблемы теплообмена и XXI Школ-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева «Проблема газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (22–26 мая 2017 г. Санкт-Петербург): В 2 т. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. Т. 1. С. 223.
15. **Иванов Н.С., Кузма-Кичта Ю.А., Лавриков А.В., Киселев Д.С.** Патент № 2665524. Способ получения наночастиц оксида алюминия, 30 августа 2018 г. Владельцы патента RU 2665524: Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ").
16. **Иванов Н.С.** Исследование методов получения наночастиц Al₂O₃ // Тезисы докладов Двадцать третьей Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов. В 3 т. Т. 3. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. С. 44.

Research of reduction thermal resistance methods in the thermal stabilizer

Yu.A. Kuzma-Kichta,¹ N.S. Ivanov,¹ A.V. Lavrikov,¹ Yu.P. Shtefanov,² I.F. Prokopenko²

¹ *National Research University «MPEI», Moscow, 111250, Russia*

² *«NewFrost» LTD, Protvino, Moscow region, 142280, Russia*

e-mail: kuzma@itf.mpei.ac.ru; ivanov.mpei@mail.ru

A method for producing aluminum oxide nanoparticles, consisting in the thermal decomposition of an aluminum salt was developed and patented. A study of the liquid capillary rise height is used to assess the stability of the coating from aluminum oxide nanoparticles. The deterioration of the transport in the coating is explained by the adsorption of carbon molecules in the aluminum oxide nanoparticles layer. The data on the thermal resistance of the investigated heat pipe models were obtained. The dependences of the thermal resistance were established for vertical heat pipe models on the transmitted heat flux for the following options: steel pipes with a joint made in the form of a pipe-in-pipe, dry and filled with water or LOCTITE SI 100 paste, pipes made of aluminum with a dry flat joint and without a joint. The aluminum pipe and steel pipe with nanoparticle coating has been least thermal resistance. Steel models without nano coating have a higher thermal resistance, both without a joint and with a joint filled with air, water and thermal grease, respectively. When applied to the evaporator coating by nanoparticles of aluminum oxide, the thermal resistance decreases, and when the orientation of the steel pipe changes from vertical to horizontal, it increases. The decrease in thermal resistance with increasing heat load for composite models of steel pipes suggests that, apparently, the contribu-

tion of condensation and evaporation zones to the total thermal resistance is comparable to the contribution of thermal conductivity at the point of contact of the joined surfaces.

Keywords: thermal stabilizer, nanoparticles, heat and mass transfer, wettability, thermal resistance, nanocoatings, heat transfer intensification.

REFERENCES

- Ivanov N.S., Kuzma-Kichta Yu.A., Lavrikov A.V. Issledovanie termicheskogo soprotivleniya sostavnogo termostabilizatora [Study of the thermal resistance of a compound thermostabilizer]. *Tezisy dokladov XXII Shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov pod rukovodstvom akad. A.I. Leont'eva «Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v ehnergeticheskikh ustanovkakh»* [Abstracts of the XXII School-Seminar for Young Scientists and Specialists under the direction of Acad. A.I. Leontyeva "Problems of gas dynamics and heat and mass transfer in power plants]. Moscow, Print shop "Shans", 2019, vol. 2, p. 109. In Russ.
- Ivanov N.S., Kuzma-Kichta Yu.A., Lavrikov A.V. Issledovanie vliyaniya sloya iz nanochastits v ispariteley na termicheskoe soprotivlenie termostabilizatora [Investigation of the effect of a layer of nanoparticles in an evaporator on the thermal resistance of a heat stabilizer]. *Tezisy dokladov XXIII nauch.-tekhn. konf. studentov i aspirantov "Radioehlektronika, ehlektrotekhnika i ehnergetika"* [Abstract of XXIII Int. youth conf. on Radioelectronics, Electrical and Power Engineering (REEPE-2018)]. Moscow: Publishing house MEI, 2018, vol. 3, p. 784. In Russ.
- Dzyubenko B.V., Kuzma-Kichta Ya.A., Leontiev A.I., Fedik I.I., Kholpanov L.P. *Intensification of Heat and Mass Transfer on Macro-, Micro-, and Nanoscales*. Begell House Publishers Inc., U.S., 2017. 630 p.
- Lavrikov A.V., Kuzma-Kichta Ya.A., Stefanov Yu.P., Prokopenko I.F., Zhukov V.M., Shustov M.V., Stenina N.A., Levashov Yu.A. Investigation of heat transfer enhancement and thermal resistance of weakly inclined thermostabilizer. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 891. P. 012150. DOI:10.1088/1742-6596/891/1/012150
- Kuzma-Kichta Yu.A., Lavrikov A.V., Stefan Yu.P., Prokopenko I.F., Levashov Yu.M. Issledovanie transportnykh svoystv ispariteley modeli termostabilizatora s razlichnoy strukturoy poverkhnosti [Study the transport properties of a model of heat stabilizer evaporator with different surface structure]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal Processes in Engineering*, 2016, vol. 8, no. 9, pp. 395–400. In Russ.
- Khodabandeh R., Furberg R. Heat transfer, flow regime and instability of a nano- and micro-porous structure evaporator in a two-phase thermosyphon loop. *International Journal of Thermal Sciences*, 2010, vol. 49, no. 7, pp. 1183–1192. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.01.016>
- Patel V.M., Rao T.S., Mehta H.B. Effect of CuO-water nanofluid on startup mechanism and thermal performance of a closed loop pulsating heat pipe. *Joint 19th IHPC and 13th IHPS, Pisa, Italy, June 10–14, 2018*.
- Cacua K., Buitrago-Sierra R., Herrera B., Gallego A., Pabón E. Surfactant effect in the thermal performance of a two-phase thermosyphon using Al₂O₃ nanofluid. *Joint 19th IHPC and 13th IHPS, Pisa, Italy, June 10–14, 2018*.
- Betancur C.L., Mangini D., Facin A., Mantelli M., Paiva K., Coutinho B., Marengo M. Experimental study of start-up in a closed loop pulsating heat pipe with alternating superhydrophobic channels. *Joint 19th IHPC and 13th IHPS, Pisa, Italy, June 10–14, 2018*
- Pis'mennyi E.N., Khayrnasov S.M., Rassamakin B.M. Heat transfer in the evaporation zone of aluminum grooved heat pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, vol. 127, part C, pp. 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.154>
- Vlassov V., Bertoldo J. Junior, dos Santos N. A comparative study of performance of heat pipes with rectangular and omega-type grooves. *Joint 19th IHPC and 13th IHPS, Pisa, Italy, June 10–14, 2018*.
- Bellani P., Milanez F., Mantelli M., Filippeschi S., Mamei M., Fantozzi F. Theoretical and experimental analyses of the thermal resistance of a loop thermosyphon for passive solar heating of buildings. *Joint 19th IHPC and 13th IHPS, Pisa, Italy, June 10–14, 2018*.
- Dashti I., Asghari S., Abedi M., Sheida M. Practical method for operating and durability tests of heat pipe based on using vacuum chamber. *Joint 19th IHPC and 13th IHPS, Pisa, Italy, June 10–14, 2018*.
- Ivanov N.S., Lavrikov A.V., Kuzma-Kichta Ya.A., Ustinov A.A., Zhukov V.M. Issledovanie mekhanizma obrazovaniya sloya iz nanochastits pri isparenii kolloidnogo rastvora [Investigation of the mechanism of formation of a layer of nanoparticles during the evaporation of a colloidal solution]. "Fundamental'nye i prikladnye problemy teplomassoobmena. Problemy gazodinamiki i teplomassoobmena v ehnergeticheskikh ustanovkakh". *Tezisy dokladov Yubilejnoj konferentsii Natsional'nogo komiteta RAN po teplo- i massoobmenu I, XXI Shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov, Sankt-Peterburg, 2017* [Fundamental and applied problems of heat and mass transfer. Problems of gas dynamics and heat and metal exchange in power plants. Abstracts of the Anniversary Conference of the National Committee of the Russian Academy of Sciences on heat and mass transfer and XXI School-seminar of young scientists and specialists, Saint Petersburg, 2017]. Moscow: Publishing house MEI, 2017, vol. 1, p. 223. In Russ.
- Ivanov N.S., Kuzma-Kichta Ya.A., Lavrikov A.V., Kuselev D.S. *Sposob polucheniya nanochastits oksida alyuminiya* [A method of producing aluminum oxide nanoparticles]. Patent RF, no. 2665524, 2018.
- Ivanov N.S. Issledovanie metodov polucheniya nanochastits AL₂O₃ [Study of methods for producing AL₂O₃ nanoparticles]. *Tezisy dokladov XXIII nauch.-tekhn. konf. studentov i aspirantov "Radioehlektronika, ehlektrotekhnika i ehnergetika"* [Abstract of XXIII Int. youth conf. on Radioelectronics, Electrical and Power Engineering (REEPE-2018)]. Moscow: Publishing house MEI, 2017, vol. 3, p. 44. In Russ.