



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе и инновациям
Национального исследовательского Томского
политехнического университета,
доктор технических наук,
Степанов Игорь Борисович.
« 04 » сентября 2019 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Диссертация «Экспериментальное исследование и математическое моделирование процессов теплопереноса в замкнутых двухфазных термосифонах» выполнена в НОЦ И.Н. Бутакова инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

В период подготовки диссертации соискатель Нурпейис Атлант Едилулы обучался в очной аспирантуре Национального исследовательского Томского политехнического университета и работал в НОЦ И.Н. Бутакова инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета в должности ассистента.

В 2012 г. окончил государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по направлению «Теплоэнергетика».

Справка о сдаче кандидатских экзаменов по истории и философии науки, иностранному языку (английский) выдана в 2017 г. и специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика выдана в 2019 г. федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель:

Кузнецов Гений Владимирович доктор физико-математических наук, профессор, основное место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», научно-образовательный центр И.Н. Бутакова, главный научный сотрудник.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Актуальность темы. Для успешной работы современного энергетического оборудования важное значение имеет отвод теплоты от отдельных тепловыделяющих элементов, поверхностей и интегральных модулей. Применение традиционных способов охлаждения циркулирующей водой или потоками воздуха не всегда осуществимо, но всегда энергозатратно. Это связано с тем, что возникает необходимость в развитых теплообменных поверхностях для отвода больших тепловых потоков. Постановка таких задач во многом определяется необходимостью решения проблемы тепловой защиты оборудования, возможностью регулирования (в рабочем диапазоне) температур машин и

аппаратов, применением эффективных способов передачи и трансформации тепловой энергии. Перегрев даже отдельных элементов технических систем в условиях выхода из строя используемого для отвода теплоты оборудования может привести к аварийному режиму работы всей установки. Целесообразным, в этой связи, является анализ возможности использования автономных (независящих от источников электроэнергии) отводящих тепло устройств.

Термосифон может использоваться для терморегулирования и термостатирования различных технических устройств и технологических процессов. Зоны испарения и конденсации в термосифоне пространственно разделены, что позволяет трансформировать тепловые потоки за счет изменения соотношения поверхностей этих фазовых превращений. Применение таких достаточно эффективных теплообменников в системах охлаждения нагреваемых до высоких температур элементов конструкций машин и аппаратов может существенно повысить надежность их работы.

На основании анализа наиболее значимых результатов исследований теплопереноса в замкнутых двухфазных термосифонах можно сделать вывод, что наибольшее значение имеет задача оценки «производительности» их работы и анализ влияния основных значимых факторов на теплопередающую способность. Основными характеристиками работы термосифонов рассматриваются, как правило, их эффективная теплопроводность или термическое сопротивление. Но, в основном, эти характеристики обеспечивают только интегральные оценки производительности термосифона и не являются базой для анализа закономерностей теплопереноса в таких теплообменниках. Более значимой для физического анализа является информация по температурным полям характерных зон термосифона. Но в связи с объективными трудностями такого рода измерений в большинстве случаев экспериментальные исследования были ориентированы на анализ изменения температур только на отдельных участках внешней поверхности корпуса теплообменника. Вследствие же достаточно интенсивного перетока теплоты по корпусу термосифона как по поперечной, так и по продольной координатам, измерений температур внешних поверхностей недостаточно для анализа процессов, протекающих в зонах испарения, конденсации и в паровом канале. Немногочисленные результаты измерений температур в полости термосифона отражают их изменение только в отдельных точках внутренней поверхности этого устройства. Для объективного анализа закономерностей процессов теплопереноса необходима информация о нестационарных распределениях температур в зонах испарения, транспорта и конденсации.

Теоретические исследования гидродинамических и тепловых процессов в термосифонах проводились в большинстве случаев с использованием коммерческих вычислительных пакетов типа Comsol и ANSYS FLUENT. Но использование таких программных продуктов возможно только при известных эмпирических характеристиках процессов фазовых превращений. Кроме того, численное моделирование с применением таких пакетов или авторских кодов сопряжено с очень длительными вычислениями даже при описании исследуемых процессов в рамках двумерных постановок.

По этой причине актуальным является проведение экспериментов с целью установления распределений наиболее значимых характеристик процессов, протекающих в термосифоне (температур жидкости и в паровом канале) при рабочих температурах, близких к критическим (высоких тепловых нагрузках). Также актуальна разработка менее сложных, по сравнению с постановками задач на базе полной системы уравнений Навье-

Стокса для пара и конденсата, математических моделей нестационарного теплопереноса в двухфазном термосифоне с целью описания процессов переноса теплоты с учетом фазовых переходов на границах раздела сред «жидкость – пар» и «пар – жидкость» при подводе теплоты к нижней крышке термосифона.

Научная новизна работы. Впервые по результатам экспериментальных исследований установлены закономерности изменения температуры в характерных сечениях парового канала, зон испарения и конденсации типичного термосифона. По результатам анализа и обобщения экспериментальных данных разработана физическая модель теплопереноса в двухфазном термосифоне. Установлены основные характеристики процессов теплопереноса в двухфазном термосифоне в рамках математической модели, существенно отличающейся от известных и учитывающей процессы свободноконвективного теплопереноса и фазовые превращения в зоне испарения, теплопроводности и фазовые превращения в зоне конденсации, при тепловых потоках, соответствующих условиям работы энергетического оборудования.

Практическая значимость результатов работы. Разработанные физические и математические модели теплопереноса в двухфазных термосифонах могут быть использованы при разработке систем охлаждения энергетического оборудования на базе двухфазных термосифонов. Предложены варианты возможного применения исследованного перспективного теплообменника в системах охлаждения силовых трансформаторов тепловых электрических станций и для извлечения геотермальной энергии с больших глубин с использованием каскада термосифонов.

Апробация работы. Основные положения и результаты, полученные при подготовке диссертации, докладывались на Всероссийской молодежной конференции «Химическая физика и актуальные проблемы энергетики» (Томск, 2012), на XI Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2014), на III–V Международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2015 – 2017), на четвертой, пятой, шестой и седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2014 – 2017), на международной молодежной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2015 – 2018).

Публикации по теме диссертации. Основные результаты диссертации представлены в трудах выше перечисленных конференций. Опубликовано 5 работ в журналах из списка рекомендованных ВАК РФ: «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов», «Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики», «Вестник ТюмГУ. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика». 11 работ в изданиях, индексируемых базами данных «Scopus» и «Web of Science»: «Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering», «European Physical Journal Web of Conferences», «MATEC Web of Conferences», 4 доклада в сборниках научных конференций, получено 2 патента на полезную модель и одобрено 2 заявки на полезную модель.

Список основных публикаций включает:

1. Кузнецов Г.В., **Нурпейис А.Е.** Экспериментальное определение температур в характерных сечениях рабочей зоны замкнутого двухфазного термосифона. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018;20(3-4):136-144. – 0,56 / 0,28 а.л.
2. Кузнецов Г. В., **Нурпейис А. Е.** Математическое моделирование температурных полей в характерных сечениях рабочей зоны замкнутого двухфазного термосифона / Г. В. Кузнецов, А. Е. Нурпейис // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4. № 1. С. 8-22. DOI: 10.21684/2411-7978-2018-4-1-8-22. – 0,92 / 0,46 а.л.
3. Максимов В.И., **Нурпейис А. Е.** Оценка эффективности замкнутых двухфазных термосифонов по результатам экспериментального определения температур в характерных сечениях рабочей зоны / В. И. Максимов, А. Е. Нурпейис // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 1. С. 41-54. DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-1-41-54. – 0,86 / 0,43 а.л.
4. **Нурпейис А.Е.** Анализ возможного метода использования геотермальной энергии // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 7. С. 17–24. – 0,49 а.л.
5. Максимов В.И., **Нурпейис А.Е.** Новый подход к моделированию процесса формирования теплового режима термосифонов больших размеров для использования геотермальной теплоты // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2019. Т. 330. № 8. С. 78–86. – 0,56 / 0,28 а.л.
6. **Nurpeiis A.E.**, Mamontov G., Valieva L. Numerical analyses of the effect of a biphasic thermosyphon vapor channel sizes on the heat transfer intensity when heat removing from a power transformer of combined heat and power station // MATEC Web of Conferences Thermophysical Basis of Energy Technologies. 2016. V 92. Article Number 01058. – 5 p. – 0,31 / 0,16 а.л.
7. **Nurpeiis A.E.** Mathematical modeling of heat transfer in closed two-phase thermosyphon / A.E. Nurpeiis. // EPJ Web of Conferences. 2014. Vol. 76. Thermophysical Basis of Energy Technologies. Article Number 01016. – 6 p. – 0,37 а.л.
8. **Nurpeiis A.E.**, Nemova T.N. The opportunity analyses of using thermosyphons in cooling systems of power transformers on thermal stations. // MATEC Web of Conferences. Heat and mass transfer in the system of thermal modes of energy – Technical and technological equipment. 2016. V. 72. Article Number 01077. – 7 p. – 0,43 / 0,3 а.л.
9. D.V. Feoktistov, E.A. Vympin, **A.E. Nurpeiis.** Experimental research of thermophysical processes in a closed two-phase thermosyphon / A.E. Nurpeiis, D.V. Feoktistov, E.A. Vympin, // MATEC Web of Conferences. 2016. V. 72. Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy – Technical and Technological Equipment. Article Number 01081. – 5 p. – 0,31 / 0,1 а.л.
10. K. O. Ponomarev, E. G. Orlova, **A. E. Nurpeiis.** Experimental study of thermosyphon operation when cooling the condensation part by drop irrigation // MATEC Web of Conferences. 2017. V. 92: Thermophysical Basis of Energy Technologies. Article Number 01006. – 4 p. – 0,25 / 0,12 а.л.
11. **A. E. Nurpeiis**, E. G. Orlova, K. O. Ponomarev. An experimental study of the influence of a thermosyphon filling ratio on a temperature distribution in characteristic points along the vapor channel height // MATEC Web of Conferences. — Les Ulis: EDP Sciences.

2017. V. 110: Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment. Article Number 01062. – 5 p. – 0,31 / 0,15 а.л.

12. K. O. Ponomarev, E. G. Orlova, **A. E. Nurpeiis**. Critical heat flux density in diphasic thermosyphons // MATEC Web of Conferences. Les Ulis: EDP Sciences. 2017. Vol. 110: Heat and Mass Transfer in the Thermal Control System of Technical and Technological Energy Equipment. Article Number 01064. – 6 p. – 0,37 / 0,12 а.л.

13. **Nurpeiis A.E.**, Nemova T.N., Ponomarev K. O. Peculiarities of temperature fields formation in vapor channels of thermosyphons with heat carriers boiling at low temperatures // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 141. The Fifth International Youth Forum “Smart Grids 2017”. Article Number 01005. – 4 p. – 0,25 / 0,1 а.л.

14. **Nurpeiis A.E.**, Orlova E. G., Mamontov G., Experimental study of temperatures in characteristic sections of the working zone of a closed two-phase thermosyphon under the condition of a heat removal by external periphery // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 141. The Fifth International Youth Forum “Smart Grids 2017”. Article Number 01006. – 5 p. – 0,31 / 0,16 а.л.

15. **Нурпейис А.Е.**, Валиева Л. Е. Математическое моделирование теплопереноса в двухфазном термосифоне в диапазоне типичных тепловых потоков от поверхности масляного бака трансформатора ТЭС // Интеллектуальные энергосистемы: труды IV Международного молодёжного форума. 2016. Т. 3. С. 6 – 8. – 0,18 / 0,17 а.л.

16. **Нурпейис А.Е.** Математическое моделирование теплопереноса в двухфазном термосифоне / А.Е. Нурпейис, Г.В. Кузнецов; науч. рук. Г.В. Кузнецов // Интеллектуальные энергосистемы: труды III Международного молодежного форум / НИТПУ. – 2015. – Т.1. – с. 39–42. – 0,25 а.л.

17. **Нурпейис А.Е.** Тепломассоперенос при образовании парового сегмента в процессе кипения / А.Е. Нурпейис // Химическая физика и актуальные проблемы энергетики; сборник тезисов и докладов Всероссийской молодежной конференции / НИТПУ. – 2012 г. – с. 202–203. – 0,12 а.л.

18. **Нурпейис А.Е.** Математическое моделирование теплопереноса в замкнутом двухфазном термосифоне / А.Е. Нурпейис // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XI Международной конференции студентов и молодых ученых, г.Томск, 22–25 апреля 2014г. / НИТПУ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. С. 642–644. – 0,18 а.л.

Названные публикации полностью отражают основное содержание диссертационной работы.

Достоверность результатов. Проведен анализ погрешностей результатов измерений при различных тепловых потоках в рамках современной теории ошибок с использованием методов математической статистики. Установлено удовлетворительное соответствие температур в термосифоне, полученных в экспериментах, и результатов теоретических исследований автора диссертации. Достоверность последних подтверждается также тестированием используемых метода и алгоритма решения на менее сложных задачах, результаты решения которых опубликованы в международных журналах.

Личный вклад автора состоит в постановке задачи, разработке методики, планировании и проведении экспериментальных исследований по регистрации температурных полей в сечениях характерных зон термосифона (испарения, транспорта и конденсации) и распределений температур по высоте и радиусу, а также в разработке

математической модели, отличающейся от известных и учитывающей процессы теплопроводности, термогравитационной конвекции и фазовые превращения в зонах испарения и процессы кондукции в зоне конденсации при тепловых потоках, соответствующих условиям работы энергонасыщенного оборудования, метода и алгоритма решения задачи теплопереноса в термосифоне, в проведении оценки достоверности полученных результатов.

Диссертация «Экспериментальное исследование и математическое моделирование процессов теплопереноса в замкнутых двухфазных термосифонах» Нурпейис Атланта Едилулы рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика.

Заключение принято на заседании научного семинара научно-образовательного центра И.Н. Бутакова инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Присутствовало на заседании 20 чел. Результаты голосования: «за» – 20 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 32 от «04» сентября 2019 г.



(Председатель научного семинара:
Борисов Борис Владимирович
Доктор физико-математических наук,
научно-образовательный центр И.Н. Бутакова, Профессор)



(Секретарь научного семинара:
Савостьянова Людмила Викторовна
Кандидат технических наук, заведующий лабораторией
ОО ИШЭ, научно-образовательный центр И.Н. Бутакова)

