Статья поступила в редакцию 19.05.15. Ред. рег. № 2262 The article has entered in publishing office 19.05.15. Ed. reg. No. 2262

УДК 621.039 doi: 10.15518/isjaee.2015.08-09.011

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ КРИТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

С.Е. Щеклеин, Е.В. Стариков, Ю.Е. Немихин, А.Д. Никитин, А.В. Жуков, С.А. Коржавин

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002 Екатеринбург, ул. Мира, д. 19
Тел: (343) 375-95-08, e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

Заключение совета рецензентов: 23.05.15 Заключение совета экспертов: 27.05.15 Принято к публикации: 31.05.15

Рассмотрены вопросы интенсивного охлаждения теплонапряженных элементов при помощи пародинамических технологий. Показана возможность пассивного отвода тепловой энергии в осевом направлении с плотностью теплового потока выше 10^6 Вт/м^2.

Ключевые слова: атомная энергетика, бассейн выдержки, термосифон, тепловая энергия, эффективность.

EXPERIMENTAL STUDY STEAM DYNAMIC SYSTEMS COOLING OF CRITICAL ELEMENTS IN EMERGENCY SITUATIONS

S.E. Shcheklein, E.V. Starikov, Yu.E. Nemikhin, A.D. Nikitin, A.V. Zhukov, S.A. Korzhavin

Urals Federal University named after the first President of Russia Boris Yeltsin
19 Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia
Tel.: (343) 375-95-08, e-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

Referred: 23.05.15 Expertise: 27.05.15 Accepted: 31.05.15

The problems of intensive cooling heat-stressed components using steam dynamic technologies. The possibility of passive heat removal in the axial direction of heat flow density above 10^6 W/m^2.

Keywords: nuclear power, cooling pond, thermosyphon heat energy, efficiency.

Сергей Евгеньевич Щеклеин
Sergey E. Shcheklein

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ.

Научный руководитель ряда реализованных инновационных проектов, в т. ч. «Энергоэффективный дом для села», «Системы солнечного энергоснабжения автономных потребителей специального назначения», «Солнечные системы охранной сигнализации» и др.

Член редколлегии журнала «Известия вузов. Ядерная энергетика», сборника трудов УГТУ-УПИ «Теплофизика ядерных энергетических установок», научно-технического журнала «Энергоэффективность и анализ». Заслуженный энергетик России, действительный член Международной энергетической академии.

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1972).

Область научных интересов: термодинамика ядерных энергетических установок, проблемы атомной энергетики и теплофизики двухфазных потоков, продление ресурса и повышение надежности оборудования АЭС, солнечная энергетика, ветровая энергетика, биоэнергетика, энергосбережение, энергоэффективность.

Публикации: более 450, в том числе 6 монографий и учебников, 28 изобретений.

Information about the author: doctor of technical science, professor, Urals State Technical University “Atomic Stations and Renewable Energy Sources” Department head.

A scientific director of several realized innovation projects, including “The energoefficient house for the village”, “Special systems of individual consumer solar energy supply”, “The solar systems for the guarding alarm” etc.

International Publishing House for scientific periodicals “Space”
Международный издательский дом научной периодики “Спейс”

A member of the editorial board of "Institute of Higher Education News. Nuclear Power" magazine, "Nuclear power units heat engineering" USTU article collection, "Energoeffectiveness and analysis" scientific magazine. A Honoured power engineering specialist of Russian Federation, a member of International Energy Academy.

Education: Urals Polytechnic Institute (1972).

Research area: nuclear power units thermodynamics; questions of nuclear energy and thermophysics of the two-phase flows; NPP equipment lifetime enduring and reliability increasing; solar, wind and bioenergetics, energy conservation, energy efficiency.

Publications: more than 450 scientific works, including 6 monographs and textbooks, 28 inventions.

Евгений Владимирович Стариков
Evgeny V. Starikov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета.

Образование: Уральский гос. технический университет (УГТУ-УПИ) (2004).

Область научных интересов: малая и нетрадиционная энергетика, энергетический анализ эффективности установок нетрадиционной энергетики, солнечная энергетика.

Публикации: 32.

Information about the author: candidate of technical sciences, associate professor of department "Nuclear power plants and renewable energy sources" Ural Federal University.

Education: Urals State Technical University (2004).

Research area: minor and alternative energetics; alternative energy plants effectiveness energetical analysis; solar energetics.

Publications: 32.

Юрий Евгеньевич Немихин
Yurii E. Nemikhin

Сведения об авторе: ст. преподаватель кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ.

Награды и научные премии: Почетная грамота министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Свердловской области за многолетний добросовестный труд по подготовке кадров для энергетических предприятий страны (2011).

Образование: Уральский гос. университет им. А.М. Горького (УрГУ) (1971).

Область научных интересов: разработка физических основ нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, методы компьютерной диагностики и мониторинга в энергетике.

Публикации: более 30, в том числе 5 в реферируемых журналах.

Information about the author: senior lecturer of Nuclear power plants and renewable energy sources department, UrFU.

Diploma of the Ministry of Energy and Housing and Utilities of the Sverdlovsk region for many years of hard work training for energy companies in the country (2011).

Education: Ural State University (1971).

Research area: development of the physical foundations of non-conventional and renewable sources of energy, methods of computer diagnostics and monitoring in the energy sector.

Publications: more than 30, including 5 in refereed journals.

Александр Дмитриевич Никитин
Alexandr D. Nikitin

Сведения об авторе: магистрант, кафедра «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета.

Победитель всероссийских выставок и конференций, имеет грамоты.

Образование: Уральский федеральный университет. (УрФУ) (2014).

Область научных интересов: малая и нетрадиционная энергетика, энергетический анализ эффективности установок нетрадиционной энергетики, солнечная энергетика, исследования теплофизических процессов в энергетике.

Публикации: 10.

Information about the author: undergraduate, department "Nuclear power plants and renewable energy sources" Ural Federal University.

Education: Ural Federal University (2014).

Research area: alternative energy, energy efficiency analysis of alternative energy systems, solar energy, study of thermophysical processes in the energy sector.

Publications: 10.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Алексей Владимирович Жуков
Alexey V. Zhukov

Сведения об авторе: магистрант, кафедра «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета.
Победитель всероссийских выставок и конференций, имеет грамоты.
Образование: Уральский федеральный университет (УрФУ) (2013).
Область научных интересов: малая и нетрадиционная энергетика, газификация биомассы, применение когенерационных установок, энергетический анализ эффективности установок нетрадиционной энергетики.
Публикации: 13.

Information about the author: undergraduate, department "Nuclear power plants and renewable energy sources" Ural Federal University.
Education: Ural Federal University (2013).
Research area: alternative energy, gasification of biomass, application of cogeneration units, energy efficiency analysis of alternative energy systems.
Publications: 13.

Сергей Александрович Коржавин
Sergey A. Korzhavin

Сведения об авторе: аспирант кафедры «Атомные электростанции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета.
Стипендиат президента РФ.
Образование: Уральский гос. технический университет (2009).
Область научных интересов: возобновляемая энергетика, биотоплива, автоматизированные системы сбора данных.
Публикации: 10.

Information about the author: postgraduate student of the Urals Federal University. Heat engineering faculty. Nuclear power plants and renewable energy sources department.
President of Russia Grant holder.
Education: Urals State Technical University (2009).
Research area: renewable energy, biofuels, automatic data collection systems.
Publications: 10.

Введение

Одной из наиболее опасных аварийных ситуаций, приводящих к запроектной аварии АЭС, является полное длительное обесточивание. В подобных аварийных условиях основной задачей систем безопасности (СБ) является сохранение целостности активной зоны реактора и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), находящегося в приреакторном бассейне выдержки (БВ). Разработка новых проектов АЭС высокого уровня безопасности требует разработки пассивных способов отвода тепла не только от активной зоны и оборудования 1-го контура, но и от бассейнов выдержки отработавшего ядерного топлива к конечному поглотителю (атмосферному воздуху) [1]. Необходимость выполнения данного требования стала очевидной после аварии на японской АЭС Фукусима-1 с реакторами BWR, где в результате потери основных и аварийных источников электроснабжения из-за воздействия цунами, вызванного землетрясением 11 марта 2011 г., был нарушен отвод остаточных тепловыделений ядерного топлива в активных зонах реакторов, а также отработавшего ядерного топлива в приреакторных бассейнах выдержки. Это привело к нагреву и испарению теплоносителя в активных зонах и охлаждающей воды в БВ, что стало причиной перегрева ядерного топлива с его повреждением и образованием значительного количества водорода. Накопление водорода под защитной оболочкой реактора, а затем и в здании реакторного отделения привело к взрывам со значительным разрушением зданий.

По данным МАГАТЭ, темп роста температур в бассейнах выдержки был весьма быстрым: температура воды в бассейне выдержки ОЯТ на энергоблоке № 4 составляла: 14 и 15 марта – 84 °С, 16 марта – данные отсутствуют. Данные по температуре воды в бассейне выдержки ОЯТ на энергоблоке № 5: 14 марта – 59,7 °С, 15 марта – 60,4 °С, 16 марта – 62,7 °С. Данные по температуре воды в бассейне выдержки ОЯТ на энергоблоке № 6: 14 марта – 58 °С, 15 марта – 58,5 °С, 16 марта – 60 °С. Все три реактора на момент землетрясения и цунами находились в режиме холодного останова.

Существующие системы, обеспечивающие отвод остаточных тепловыделений от БВ, являются системами «активного» принципа действия с подачей охлаждающей воды за счет работы циркуляционных насосов. Поэтому в условиях длительной потери электроснабжения собственных нужд и невозможности подключения аварийных источников электроэнергии обеспечение нормального отвода остаточных тепловыделений ОЯТ определяется временем испарения воды из БВ и составляет, в зависимости от загрузки БВ топливом, от нескольких суток до нескольких часов. Повышение температуры с последующим испарением воды приведет к началу пароциркониевой реакции с образованием водорода. При

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

оголении наружной поверхности оболочек тепловыделяющих элементов ОЯТ условия нормального теплоотвода нарушаются, что приводит к их повреждению и становится причиной радиационной аварии.

В то же время необходимость создания пассивных систем, основанных, как правило, на принципах естественной конвекции, входит в противоречие с необходимостью уменьшения объемов зданий и сооружений АЭС, т.к. в силу малой интенсивности процессов переноса тепла требует значительных поверхностей теплообмена, низких гидравлических сопротивлений трактов и значительных проходных сечений охлаждающей среды.

Интерес создателей новой техники вызывают более интенсивные, чем естественная конвекция, способы передачи тепла окружающей среде, основанные на естественных принципах при относительно малых тепловых напорах. Одним из таких методов является использование разницы плотностей жидкостей и паров в гравитационном поле, реализованное в конструкциях двухфазных термосифонов [2-10]. Детальный теоретический анализ использования данной технологии отвода тепла выполнен в работах [11-14], где показана принципиальная возможность и эффективность применения термосифонного метода. Однако, несмотря на кажущуюся простоту и хорошую изученность теплофизических процессов, протекающих в этих устройствах, имеющихся теоретических и экспериментальных данных недостаточно для того, чтобы достоверно определить передаваемую мощность, выбрать и создать конструкцию теплообменного оборудования, способного надежно термостабилизировать бассейн выдержки ОЯТ [11-13].

Целью настоящей работы является экспериментальное обоснование возможности использования одного из вариантов термосифонного метода – пародинамического отвода теплоты от защищаемого объекта (БВ ОЯТ).

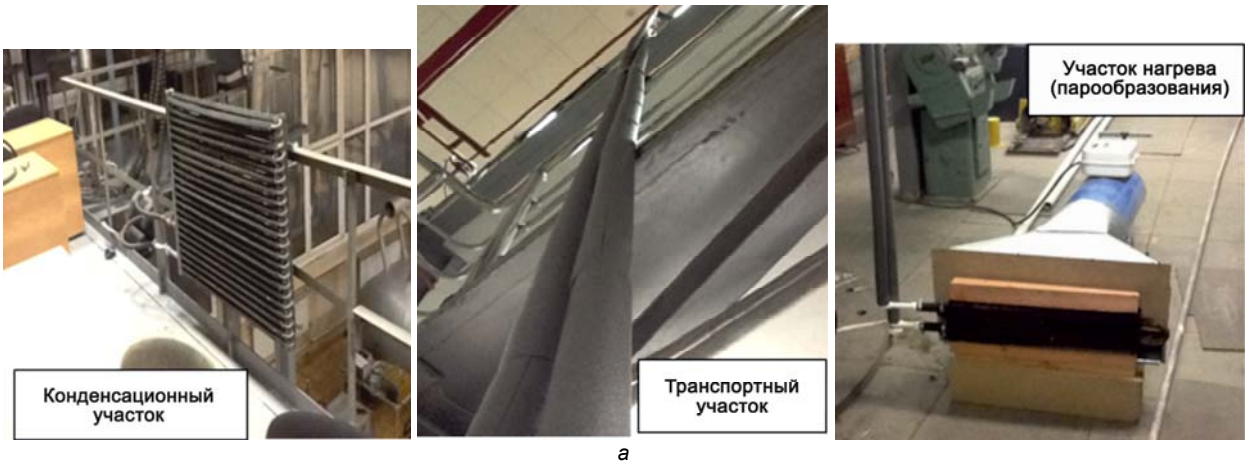
Методика экспериментального исследования

Эксперименты проводились на двух органических низкокипящих теплоносителях – этиловом спирте и ацетоне с разными температурами начала парообразования.

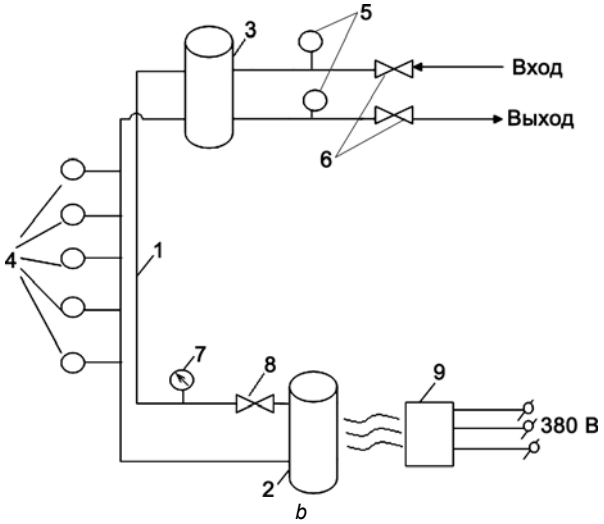
Теплообменник-испаритель контура обогревался двумя методами:

– горячим воздухом, подаваемым при помощи тепловой пушки;

– водой, нагретой до 90 °С, путем помещения его в бак-термостат.



a



b

Рис. 1. Внешний вид (*a*) и общая схема (*b*) экспериментальной установки:
1 – транспортный участок; 2 – нагреватель-испаритель; 3 – конденсатор; 4, 5 – датчики температуры; / 6, 8 – регулирующие вентили; 7 – манометр; 9 – тепловая пушка

Fig. 1. A view (*a*) and general scheme (*b*) of the experimental setup:
1 – transport sector; 2 – a heater-evaporator; 3 – capacitor; 4, 5 – temperature sensors; 6, 8 – control valves; 7 – manometer; 9 – heat gun

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

Контур установки представлял собой протяженный участок трубопроводов, отводящих образующиеся в испарителе пары в расположенный выше теплообменник – воздушный конденсатор; образующийся конденсат возвращался под действием силы тяжести в испаритель. Охлаждение теплообменника-конденсатора осуществлялось естественной конвекцией воздуха.

Контур установки имел значительные размеры, так, суммарная длина паровых и конденсатных трубопроводов превышала 15 метров, что требуется для отвода теплоты на значительные расстояния в проектах современных АЭС. Процессы испарения, конденсации, движения потоков пара и конденсата развиваются во времени и имеют нестационарный характер.

Внешний вид и общая схема экспериментальной установки приведены на рис. 1.

Для получения информации об изменениях температур и давлений в протяженном контуре был разработан быстродействующий 16-канальный автоматизированный измерительный комплекс, состоящий из аналого-цифрового преобразователя, совместимого с персональным компьютером, мультиплексора и датчиков температуры. Система позволяет в автоматическом режиме производить замеры температуры с одновременным формированием массива данных в памяти компьютера. Основные технические характеристики системы:

Разрядность, бит	12 (без знака)
Число каналов	16
Диапазон измеряемых напряжений, В	от 0 до +5
Максимальное число измерений в секунду	200

Особенностью данного прибора являются: большое быстродействие (максимальная частота дискретизации составляет до 75 кГц), высокая точность измерений (разрешение АЦП – 12 бит), достаточно большое число каналов (с общей землей 16 шт.), входное сопротивление не менее 1 МОм, время преобразования не более 10 мкс, передача данных осуществляется посредством порта типа RS-232. Стандарт файла данных позволяет использовать результаты в расчетах Excel.

Результаты исследований

Результаты экспериментальных исследований для ацетона приведены на рис. 2-4. Исследования проводились в нестационарном режиме при нагреве испарителя водой, нагретой до 90 °С, путем помещения его в бак-термостат.

Используемые обозначения термопар и их местоположение на контуре установки:

1. Выход из испарителя
2. Восходящий поток на высоте 2 м от испарителя
3. Восходящий поток на высоте 5 м от испарителя
4. Вход в конденсатор
5. Выход из конденсатора
6. Нисходящий поток на высоте 2 м от испарителя
7. Нисходящий поток на высоте 5 м от испарителя
8. Вход в испаритель

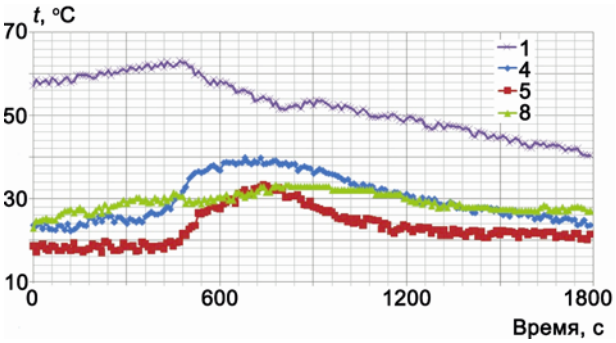


Рис. 2. Зависимость температур в характерных точках от времени
Fig. 2. Dependence of the temperatures at characteristic points from time

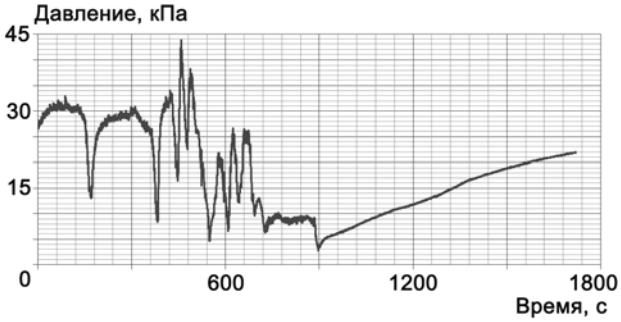


Рис. 3. Зависимость давления в контуре от времени
Fig. 3. Dependence of pressure in the circuit from time

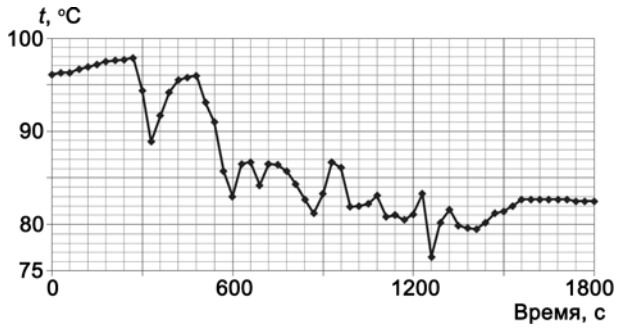


Рис. 4. Зависимость температуры греющей воды от времени
Fig. 4. Dependence of temperature of heating water from time

Вторая серия экспериментов проводилась с использованием в качестве теплоносителя этилового спирта. Исследования проводились в стационарном режиме при нагреве горячим воздухом, подаваемым при помощи тепловой пушки.

Результаты этих исследований приведены на рис. 5-6.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

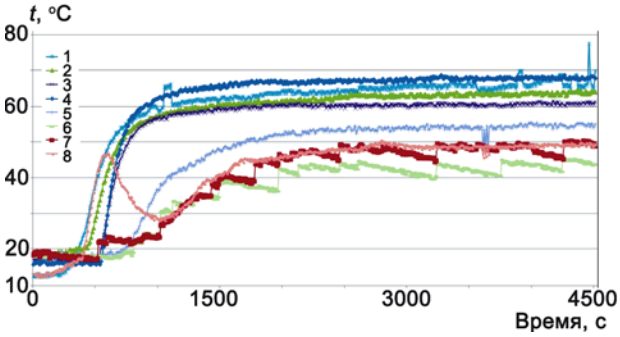


Рис. 5. Зависимость температур в характерных точках от времени
Fig. 5. Dependence of the temperatures at characteristic points from time

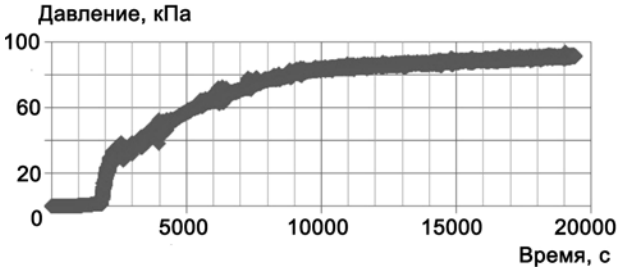


Рис. 6. Зависимость давления в контуре от времени
Fig. 6. Dependence of pressure in the circuit from time

Обсуждение и анализ результатов исследования

Данные экспериментов как для ацетона, так и для этилового спирта, полученные как по стационарной, так и нестационарной методикам, показывают следующее:

– при всех исследованных тепловых нагрузках в пародинамическом контуре возникала устойчивая циркуляция фаз, отсутствовали ограничения, характерные для тепловых труб и термосифонов, в т.ч. связанные с препятствием движению конденсата восходящим паровым потоком;

– после переходного процесса, связанного с прогревом и началом парообразования, происходит стабилизация температур и давления в контуре.

Оценка передаваемой тепловой мощности контура производилась в нестационарном режиме по количеству тепла, отведенного от бака с нагретой до 90 °С водой, и количеству тепла, воспринятого теплообменником-конденсатором:

– полная мощность, Вт, отводимая теплообменником-испарителем от греющей среды:

$$Q = \frac{V \rho c_p \Delta t}{\tau}, \qquad (1)$$

– плотность теплового потока в теплообменнике-испарителе, Вт/м^2:

$$q = \frac{Q}{LS}, \qquad (2)$$

– плотность теплового потока в осевом направлении контура, Вт/м^2:

$$q_{\text{ос}} = \frac{4Q}{\pi D^2}, \qquad (3)$$

где V – объем нагретой воды в баке, м^3; ρ, c_p – плотность и удельная теплоемкость воды, кг/м^3 и Дж/кг·°С; Δt – изменение температуры воды в процессе отвода тепла, °С; τ – время измерения, с; L, S – длина и периметр труб в теплообменнике-испарителе, м; D – диаметр трубопроводов теплопередающего контура, м.

Обработка результатов измерений с помощью (1)-(3) позволила произвести оценку теплопередающей способности пародинамического контура:

Отводимая мощность, Вт	465
Отводимая мощность без тепловых потерь, Вт	445
Плотность теплового потока в теплообменнике-испарителе, кВт/м^2	3,44
Плотность теплового потока в осевом направлении контура, кВт/м^2	$2{,}21 \cdot 10^3$

Выводы

Экспериментально показана возможность отвода значительных тепловых мощностей на значительные расстояния (свыше 10 м) при помощи разработанного пародинамического контура с низкокипящими теплоносителями.

Полученные результаты осевых переносов тепла являются беспрецедентно высокими (выше 10^6 Вт/м^2) и могут быть еще увеличены интенсификацией теплообмена (оребрение) как со стороны испарителя (охлаждаемая зона) так и со стороны конденсатора (зона отвода тепла).

Список литературы

1. «Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии НП-061-05», утвержденные Постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30 декабря 2005 г. № 23.

References

1. «Pravila bezopasnosti pri hranenii i transportirovanii âdernogo topliva na ob"ektah ispol'zovaniâ atomnoj ènergii NP-061-05», utveržděnnye Postanovleniem Federal'noj služby po èkologičeskomu, tehnologičeskomu i atomnomu nadzoru ot 30 dekabrâ 2005 g. № 23.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"
Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

2. Пиоро И.Л., Антоненко В.А., Пиоро Л.С. Эффективные теплообменники с двухфазными термосифонами. Киев: Наукова думка, 1991.

3. Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика. – 2-е изд., дополненное и переработанное. Киев: Факт, 2005.

4. Васильев Л.Л. Теплообменники на тепловых трубах. Минск: Наука и техника, 1981.

5. Эва В., Асакавичюс И., Гайгалис Б. Низкотемпературные тепловые трубы. Вильнюс: Мокслас, 1982.

6. Дан П. , Рей Д. Тепловые трубы: Пер. с англ. М.: Энергия, 1979.

7. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Чулков Б.А., Ягодкин И.В. Технологические основы тепловых труб. М.: Атомиздат, 1960.

8. Васильев Л.Л., Киселев В.Г., Матвеев Ю.Н., Молодкин Ф.Ф. Теплообменники-утилизаторы на тепловых трубах / Под ред. Л. И. Колыхана. Минск: Наука и техника, 1987.

9. Безродный М.К., Волков С.С., Мокляк В.Ф. Двухфазные термосифоны в промышленной теплотехнике. Киев: Вища школа, 1991.

10. Japikse D., Winter R.F. Single-phase transport processing the open thermosyphon // Int. J. Heat Mass Transfer. 1971. Vol. 14, No. 3. P. 427-441.

11. Подопригора А.В., Свириденко И.И., Шевелев Д.В. Пассивная система ремонтного расхолаживания ВВЭР-1000 // Вестник СевНТУ. 2011. Вып. 119. С. 127-132.

12. Свириденко И.И., Шевелев Д.В., Выборнов С.С. Расчетная оценка эффективности СПОТ прореакторного бассейна выдержки ОЯТ. Сб. научных трудов СНУЯЕ и П. Севастополь. 2013 С. 58-66.

13. Federovich E.D., Poluzunov I.I. Technical issues of wet and dry storage facilities for spent nuclear fuel / Safety related issues of spent nuclear fuel storage. Springer, 2007. P. 189-208.

14. Vasiliev L.L., Vasiliev L.L. Jr. Heat pipes and thermosyphons for thermal management of solid sorption machines and fuel cells. In: Heat Pipes and Solid Sorption Transformation: Fundamentals and Practical Applications / Ed. by L.L. Vasiliev, S. Kaka. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton. London – New York, 2013. P. 213-258.

15. Стариков Е.В., Немихин Ю.Е., Щеклеин С.Е. Исследование многотрубного термосифонного теплообменника // Научные труды молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ XIII: сб. статей. Екатеринбург, 2007.

2. Pioro I.L., Antonenko V.A., Pioro L.S. Èffektivnye teploobmenniki s dvuhfaznymi termosifonami. Kiev: Naukova dumka, 1991.

3. Bezrodnyj M.K., Pioro I.L., Kostûk T.O. Processy perenosa v dvuhfaznyh termosifonnyh sistemah. Teoriâ i praktika. – 2-e izd., dopolnennoe i pererabotannoe. Kiev: Fakt, 2005.

4. Vasil'ev L.L. Teploobmenniki na teplovyh trubah. Minsk: Nauka i tehnika, 1981.

5. Èva V., Asakavičûs I., Gajgalis B. Nizkotemperaturnye teplovye truby. Vil'nûs: Mokslas, 1982.

6. Dan P. , Rej D. Teplovye truby: Per. s angl. M.: Ènergiâ, 1979.

7. Ivanovskij M.N., Sorokin V.P., Čulkov B.A., Âgodkin I.V. Tehnologičeskie osnovy teplovyh trub. M.: Atomizdat, 1960.

8. Vasil'ev L.L., Kiselev V.G., Matveev Û.N., Molodkin F.F. Teploobmenniki-utilizatory na teplovyh trubah / Pod red. Л. I. Kolyhana. Minsk: Nauka i tehnika, 1987.

9. Bezrodnyj M.K., Volkov S.S., Moklâk V.F. Dvuhfaznye termosifony v promyšlennoj teplotehnike. Kiev: Viŝa škola, 1991.

10. Japikse D., Winter R.F. Single-phase transport processing the open thermosyphon // Int. J. Heat Mass Transfer. 1971. Vol. 14, No. 3. P. 427-441.

11. Podoprigora A.V., Sviridenko I.I., Ševelev D.V. Passivnaâ sistema remontnogo rasholaživaniâ VVÈR-1000 // Vestnik SevNTU. 2011. Vyp. 119. S. 127-132.

12. Sviridenko I.I., Ševelev D.V., Vybornov S.S. Rasčetnaâ ocenka èffektivnosti SPOT prireaktornogo bassejna vyderžki OÂT. Sb. naučnyh trudov SNUÂE i P. Sevastopol'. 2013 S. 58-66.

13. Federovich E.D., Poluzunov I.I. Technical issues of wet and dry storage facilities for spent nuclear fuel / Safety related issues of spent nuclear fuel storage. Springer, 2007. P. 189-208.

14. Vasiliev L.L., Vasiliev L.L. Jr. Heat pipes and thermosyphons for thermal management of solid sorption machines and fuel cells. In: Heat Pipes and Solid Sorption Transformation: Fundamentals and Practical Applications / Ed. by L.L. Vasiliev, S. Kaka. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton. London – New York, 2013. P. 213-258.

15. Starikov E.V., Nemihin Û.E., Ŝeklein S.E. Issledovanie mnogotrubnogo termosifonnogo teploobmennika // Naučnye trudy molodyh učenyh GOU VPO UGTU-UPI XIII: sb. statej. Ekaterinburg, 2007.

Транслитерация по ISO 9:1995

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"