

Выполнено моделирование перенапряжений в сети 10 кВ в программном комплексе Multisim для различных режимов работы нейтрали. Получены осциллограммы фазных напряжений для сетей с изолированной и заземленной через резистор нейтралью. Произведен расчет кратности перенапряжений для исследуемой сети в различных режимах работы. Экспериментально получено, что применение резистора заземления нейтрали, выбранного из стандартного ряда (как наиболее близкого к рассчитанному значению), позволяет снизить кратность перенапряжений до допустимых значений, вследствие чего снижается износ изоляции и уменьшается возможность зарождения частичных разрядов в кабельных линиях.

Л и т е р а т у р а

1. Евминов, Л. И. Резистивное заземление нейтрали в распределительных сетях 6–35 кВ / Л. И. Евминов, Т. В. Алферова // Агротехника и энергообеспечение. – 2019. – № 4 (25). – С. 94–109.
2. Правила устройства электроустановок / Изд. шестое, перераб. и доп. – Минск : Дизайн ПРО, 2007. – 703 с.
3. ТКП 181–2009. (02230). Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – Минск : Минэнерго. – 325 с.
4. СТП 09110.20187.09–55. Методические указания по заземлению нейтралей сетей 6–35 кВ. – Минск. : Белэнергосетьпроект, 2009.

УДК 536.24

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ МАКСИМАЛЬНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ТЕРМОСИФОНАХ С ЦИРКУЛЯЦИЕЙ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

А. В. Шаповалов, Н. М. Кидун, Т. Н. Никулина, В. В. Чернявская
Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Проанализированы возможные кризисы теплопереноса в замкнутых двухфазных термосифонах с организованной циркуляцией теплоносителя, а также максимальные тепловые потоки в термосифонах.

Ключевые слова: термосифоны, кризис, циркуляция, промежуточный, максимальный, теплоноситель.

ANALYSIS OF STUDIES OF MAXIMUM HEAT FLOWS IN THERMOSYPHONS WITH CIRCULATION OF INTERMEDIATE COOLANT

A. V. Shapovalov, N. M. Kidun, T. N. Nikulina, V. V. Chernyavskaya
Sukhoi State Technical University of Gomel, the Republic of Belarus

The article analyzes possible heat transfer crises in closed two-phase thermosyphons with organized coolant circulation, maximal heat fluxes in thermosyphons.

Keywords: thermosyphons, crisis, circulation, intermediate, maximum, coolant.

Так же как и при исследовании обычных термосифонов максимальные тепловые потоки определялись в момент наступления кризисных явлений, фиксируемых по резкому изменению температуры стенки трубы на обогреваемом участке.

В соответствии с различными схемами циркуляции промежуточного теплоносителя исследования различных конструкций термосифонов проведены в три этапа: 1) исследование термосифонов с простейшим испарительным циркуляционным контуром; 2) исследование термосифонов с испарительно-конденсационным циркуляционным контуром; 3) исследование горизонтальных и слабонаклонных термосифонов.

При этом исследовалось влияние на максимальные тепловые потоки поперечных размеров подъемного и опускного канала, высоты циркуляционного контура, длины зоны нагрева, относительного заполнения циркуляционного контура жидкостью, давления и рода промежуточного теплоносителя.

Как показал анализ работ, кризис теплопереноса в контурах с естественной циркуляцией связан с достижением некоторой критической скорости паровой фазы в подъемном канале контура.

Влияние скорости циркуляции на максимальные значения осевых тепловых потоков свидетельствует о возможном существовании в парогенерирующем канале кризиса теплообмена, связанного с испарением пристенной пленки жидкости, т. е. кризиса теплообмена второго рода.

Таким образом, в данных условиях кризис теплообмена в термосифоне определяется (как и в случае термосифонов обычной конструкции) достижением некоторого критического значения приведенной скорости паровой фазы в подъемном канале циркуляционного контура. Анализ показывает, что указанное критическое значение приведенной скорости пара достигается при некотором предельном отношении площадей поперечного сечения опускного и подъемного каналов, которое для данной рабочей жидкости зависит от давления в термосифоне.

Для выяснения характера зависимости критической скорости пара в подъемном канале от остальных параметров термосифонов были проведены опыты в области автомодельности относительно условий течения жидкости в опускном канале.

С увеличением длины зоны нагрева выше некоторого предельного значения на выходе из подъемного канала при околочитических нагрузках устанавливается кольцевой режим течения двухфазного потока. В этих условиях кризисы теплообмена, возникающие на участке с наиболее высокой скоростью пара, не зависят от предыстории потока и, следовательно, не зависят от длины зоны нагрева.

Приведенный анализ опытных данных позволяет заключить, что в термосифонах с простейшим испарительным циркуляционным контуром кризисы теплообмена не связаны с гидродинамической обстановкой двухфазного слоя непосредственно у поверхности нагрева, т. е. с кризисами теплообмена первого рода. В этих условиях наступление кризисных явлений связано либо с испарением пристенной пленки жидкости (кризис второго рода), либо с потерей устойчивости двухфазного потока в различных режимах его течения при достижении паровой фазой некоторой критической скорости.

Проведено исследование максимальных тепловых потоков в вертикальных термосифонах с испарительно-конденсационным контуром.

Принципиальной особенностью рассмотренных ранее конструкций термосифонов является наличие в них (в том или ином виде) сепарационной камеры, способствующей разделению фаз на выходе из подъемной части контура с образованием в этой камере свободного уровня жидкости.

Анализ полученных опытных данных показал, что также как и в термосифонах с простейшим испарительным контуром циркуляции, максимальная теплопередающая способность изучаемых здесь термосифонов в общем случае может быть ограничена условиями течения теплоносителя как в подъемном, так и в опускном канале.

Однако при достаточно большом соотношении площадей поперечного сечения опускающего и подъемного каналов максимальная плотность теплового потока не зависит от размеров опускающего канала.

Как показали результаты визуальных наблюдений, проведенных на термосифонах со стеклянными вставками на адиабатных участках, в диапазоне скоростей пара, обеспечивающих спутное движение фаз, возможно существование вспененного, кольцевого и дисперсно-кольцевого режимов течения. Переход от одного режима течения к другому сопровождается резким изменением гидродинамических характеристик (гидравлического сопротивления, локального паросодержания и т. д.), которые могут служить причиной кризиса теплообмена на участке нагрева. Указанная смена режимов течения возможна в термосифонах различных геометрических размеров в зависимости от приведенной скорости паровой фазы. Однако, как показывает эксперимент, не каждый из кризисных переходов имеет одинаково существенное значение для термосифонов различных параметров. Вероятно, отмеченные переходы оказывают различное влияние на условия теплообмена в зависимости от влагосодержания двухфазного потока на обогреваемом участке канала. В свою очередь, влагосодержание потока в подъемном канале рассматриваемых термосифонов зависит от количества промежуточного теплоносителя и соотношения геометрических размеров подъемного и опускающего каналов.

Таким образом, максимальная теплопередающая способность термосифонов с испарительно-конденсационным контуром в общем случае может быть ограничена условиями течения теплоносителя на различных участках циркуляционного контура. Однако принципиальными ограничениями максимальных тепловых потоков (так же как и в термосифонах с простейшим испарительным контуром) являются кризисные явления, возникающие на адиабатическом участке термосифона и связанные с достижением критических значений приведенной скорости паровой фазы. При этом в зависимости от условий, обеспечивающих различное влагосодержание теплоносителя в подъемном канале, максимальные тепловые потоки могут быть ограничены тремя видами кризисных явлений, характеризующихся различными уровнями критических скоростей пара.

Анализ распределения температур в поперечном сечении наклонных термосифонов показал, что причиной возникновения пульсаций при малых углах наклона относительно горизонта является расслоение двухфазного слоя промежуточного теплоносителя. Возникающий при этом в районе верхней образующей перегрев стенки трубы (в условиях подвода тепла при $q = \text{const}$) способствует при омывании ее волнами жидкости интенсивному образованию паровых пробок и выбросу жидкости из зоны нагрева в конденсационную часть термосифона. В результате этих явлений работа термосифона приобретает неустойчивый характер. В связи с этим была разработана конструкция термосифона, обеспечивающая равномерное омывание обогреваемой стенки трубы за счет создания условий для организованной поперечной циркуляции промежуточного теплоносителя. Организованная циркуляция теплоносителя в поперечном сечении устройства достигается с помощью коаксиальной внутренней вставки, расположенной в пределах зоны нагрева и имеющей щелевые отверстия вдоль верхней и нижней образующих.

При обеспечении условий, предотвращающих перегрев поверхности нагрева вследствие расслоения двухфазной смеси, кризис тепломассопереноса в вертикальных и горизонтальных термосифонах имеет единую физическую природу и связан с нарушением устойчивости осевых потоков жидкости и пара вследствие взаимодействия фаз на границе их раздела.

В процессе исследований установлено, что в зависимости от степени заполнения жидкостью термосифон может работать в режиме как замкнутого, так и разомкнутого контура. В случае относительно малого количества жидкости движущий напор циркуляции недостаточен для инвертирования пленки жидкости, образующейся в конденсаторе, в результате чего в кольцевом канале наблюдается встречное движение паровой и жидкостной фаз.

С увеличением количества жидкости происходит замыкание циркуляционного контура и вследствие этого резкое увеличение максимальных тепловых потоков до значений, близких к тем, которые имеют место для вертикальных термосифонов. Анализ опытных данных показывает, что замыкание циркуляционного контура происходит при степени заполнения, обеспечивающей практически полное заполнение жидкостью внутренней полости циркуляционной вставки.

Таким образом, максимальные тепловые потоки в изогнутых термосифонах, работающих по принципу испарительно-конденсационного контура, с наклонным участком подвода теплоты и вертикальным участком отвода теплоты, ограничены теми же кризисными явлениями (или их комбинацией), что и в вертикальных термосифонах.

По результатам литературного обзора были изучены особенности процессов переноса в горизонтальных и слабонаклонных термосифонах. Горизонтальные и слабонаклонные двухфазные термосифоны представляют собой особый класс автономных теплопередающих устройств гравитационного типа. Они могут быть эффективно использованы для решения задач нагрева, охлаждения и термостатирования объектов в самых различных областях техники. Однако эффективное использование этих устройств ограничено опасениями их применения из-за низкого гидростатического напора для циркуляции теплоносителя внутри горизонтального термосифона и недостаточной изученности процессов переноса в замкнутой горизонтальной противоточной системе.

Анализ возможных кризисных явлений в процессах теплопереноса в горизонтальном двухфазном термосифоне показал, что так же как и в вертикальных термосифонах наиболее существенным и малоуправляемым кризисным явлением является гидродинамический кризис противоточного движения фаз, определяемый потерей устойчивости поверхности раздела жидкости и потока пара.

Литература

1. Безродный, М. К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика / М. К. Безродный, И. Л. Пиоро, Т. О. Костюк. – Киев : Факт, 2005. – 704 с.
2. Тепловые трубы и термосифоны для систем тепло- и хладоснабжения / Л. Л. Васильев [и др.] // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве : сб. тр. : в 2 ч. / Ин-т жилищно-коммунального хоз-ва НАН Беларуси ; под общ. ред. В. О. Китикова. – Минск : БГТУ, 2021. – С. 172–179.
3. Шаповалов, А. В. Способы интенсификации теплообмена в теплопередающих устройствах / А. В. Шаповалов, Т. Н. Никулина, К. А. Светличный // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2022 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2022.
4. Применение замкнутых двухфазных теплопередающих систем в инновационных системах трансформации тепла / А. В. Шаповалов [и др.] // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 28–29 апр. 2022 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2022.