

независимых цифровых ядра и, таким образом, к одному Brick можно подключить до четырех устройств защиты по схеме «точка – точка».

Для защиты каждого присоединения используются два одинаковых терминала защиты, каждый из которых может общаться с каждым Brick, установленным на выключателе, т. е. неисправность любого компонента системы не приводит к фатальным последствиям.

Переход к передаче сигналов в цифровом виде на всех уровнях управления ПС позволит получить целый ряд преимуществ, в том числе:

- существенно сократить затраты на кабельные вторичные цепи и каналы их прокладки, приблизив источники цифровых сигналов к первичному оборудованию;
- повысить электромагнитную совместимость современного вторичного оборудования – микропроцессорных устройств и вторичных цепей благодаря переходу на оптические связи;
- упростить и, в конечном итоге, удешевить конструкцию микропроцессорных интеллектуальных электронных устройств за счет исключения трактов ввода аналоговых сигналов;
- унифицировать интерфейсы устройств IED, существенно упростить взаимозаменяемость этих устройств (в том числе замену устройств одного производителя на устройства другого производителя) и др.

Таким образом, можно сделать выводы о целесообразности использования технологий ЦПС: цифровые подстанции исключают электрические связи между высоковольтным оборудованием и панелями релейной защиты и управления, что создает более безопасные условия работы и в то же время снижает требования к занимаемой площади, затраты на строительство, на монтажные и пусконаладочные работы, на обслуживание всей системы и эксплуатационные затраты. Цифровые подстанции являются ключевым компонентом интеллектуальной сети, в которой появляется все большее количество непостоянных возобновляемых источников электроэнергии, а также помогают повысить безопасность и надежность за счет нового качества предоставляемых данных и сокращения времени принятия решений при авариях.

УДК 536.24

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕРМОСИФОНОВ, ЗАПРАВЛЕННЫХ ХЛАДАГЕНТАМИ**

**А. В. Шаповалов Н. М. Кидун, Т. Н. Никулина**

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь*

В настоящее время термосифоны используются в промышленности достаточно редко. Объяснить данное явление можно тем, что еще недостаточно изучена физика процессов, протекающих в термосифонах (совместно протекающие процессы теплопроводности, конвекции и фазовых переходов в зонах испарения и конденсации). Помимо этого накопленные знания в данной области представляют собой, как правило, выводы, полученные для конкретных вариантов термосифонов и теплоносителей, конструктивных схем и технических решений [1]. Анализ наиболее значимых результатов исследований теплопереноса в замкнутых двухфазных термосифонах показывает, что наиболее значимыми характеристиками их работы являются эффективная теплопроводность или термическое сопротивление [2]–[5].

## Секция 5. Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика 207

Цель данного исследования заключается в определении параметров работы эффективных двухфазных замкнутых теплопередающих систем, заправленных хладагентами R134a, R407c, R410a, R404a при разных углах наклона.

**Экспериментальные данные.** Для исследования процессов, протекающих в полости термосифона, на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и экология» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого» был создан экспериментальный стенд, представленный на рис. 1.

На стенде была проведена серия экспериментальных исследований замкнутых двухфазных теплопередающих устройств (термосифона без внутренних циркуляционных вставок и пародинамического термосифона), заправленных озонобезопасными хладагентами R134a, R407c, R404a, R410a, в диапазоне подводимых тепловых потоков 20–135 Вт.

Установленные экспериментальные данные в дальнейшем позволят разработать эффективные теплообменники с двухфазными теплопередающими элементами для их применения в энергетике, холодильной технике, системах вентиляции и кондиционирования, промышленности, с целью уменьшения потребляемой энергии, материалоемкости, а также повышения качества выпускаемой продукции.



*Рис. 1. Экспериментальный стенд*

На рис. 2 представлен график результатов опытных данных для термосифона, заправленного фреонами R134a, R407c, R410a, R404a. Анализ полученного графика позволяет установить зависимость параметров, характеризующих эффективность работы термосифона, в частности термического сопротивления, от свойств фреонов, используемых для их заправки. Изучив свойства используемых для заправки фреонов R134a, R407c, R410a, R404a, было установлено, что наибольшее влияние на значение термического сопротивления термосифона, от которого зависит значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  (обратно пропорциональная зависимость), оказывают такие параметры, как давление  $p$ , плотность  $\rho$ , удельная теплота парообразования  $r$ , динамическая вязкость  $\mu$ , удельная теплоемкость  $c$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda$  используемой рабочей жидкости.

Анализ экспериментальных данных показал, что термическое сопротивление  $R$  термосифона непрерывно падает с увеличением давления при кипении фреонов. Это свидетельствует о росте коэффициента  $\alpha$  и повышении эффективности процесса теплоотдачи. Однако при низких давлениях зависимость  $\alpha$  от  $p$  менее резкая, чем при высоких.

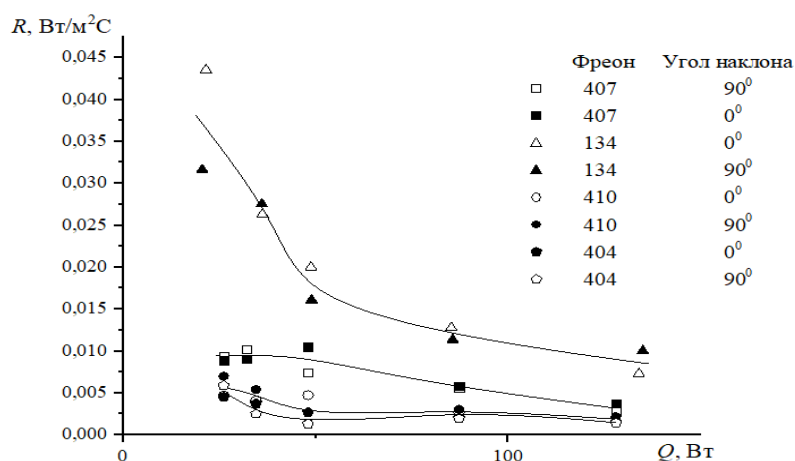


Рис. 2. Зависимость термического сопротивления от подводимого теплового потока для классического и пародинамического термосифона, заправленного фреонами R134A, R407C, R410A при углах наклона 0, 45 и 90 град

Исследование влияния коэффициента теплопроводности  $\lambda$  на значение термического сопротивления термосифона показало, что с ростом  $\lambda$  значение термического сопротивления уменьшается, следовательно, повышается эффективность работы термосифона. Также установлено незначительное уменьшение значения термического сопротивления с увеличением удельной теплоемкости фреона.

Плотность  $\rho$  и динамическая вязкость  $\mu$  фреонов также оказывают непосредственное влияние на интенсивность процесса передачи тепла в двухфазных теплопередающих устройствах, в частности фреон R134a с наибольшим значением плотности имеет наибольшие значения термических сопротивлений на всем диапазоне подводимых мощностей. Для фреонов R407c, R410a, R404c было установлено, что изменение угла наклона термосифона относительно горизонтальной плоскости не влияет на теплопередающие характеристики термосифона, термические сопротивления для указанных выше хладагентов имеют близкие значения и колеблются в диапазоне  $0,0025\text{--}0,012 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$  при подводимой тепловой нагрузке 20–135 Вт.

Влияние всех вышеуказанных параметров в большей степени проявляется в диапазоне небольших подводимых мощностей до 50 Вт. С ростом подводимой нагрузки значение термического сопротивления термосифона становится более стабильным и практически не меняется на всем диапазоне.

В рамках данного исследования также проводились эксперименты с замкнутыми двухфазными теплопередающими устройствами (термосифона без внутренних циркуляционных вставок и пародинамического термосифона), заправленными дистиллированной водой (рис. 3), которые показали, что угол наклона термосифона оказывает большое влияние на теплопередающие характеристики термосифона, а также термическое сопротивление в термосифонах, заправленных дистиллированной водой значительно ниже по сравнению с термическим сопротивлением термосифонов, заправленных хладагентами R407, R410, R404.

Классический термосифон (рис. 3, а) на всем диапазоне подводимых мощностей работает в оптимальном режиме с наименьшим термическим сопротивлением в вертикальном положении, т. е. при угле наклона  $90^\circ$ . Изменение положения термосифона без внутренних циркуляционных вставок, заправленного водой, целесообразно

разно только при значении подводимой нагрузки от  $400 \text{ Вт/м}^2$ , так как в диапазоне величин  $Q$  до  $400 \text{ Вт/м}^2$  не достигнуты оптимальные параметры работы устройства: объема пара, образующегося при кипении в испарителе, недостаточно для стабильной циркуляции теплоносителя, поэтому происходит быстрое охлаждение пара и не хватает движущей силы для проталкивания конденсата.

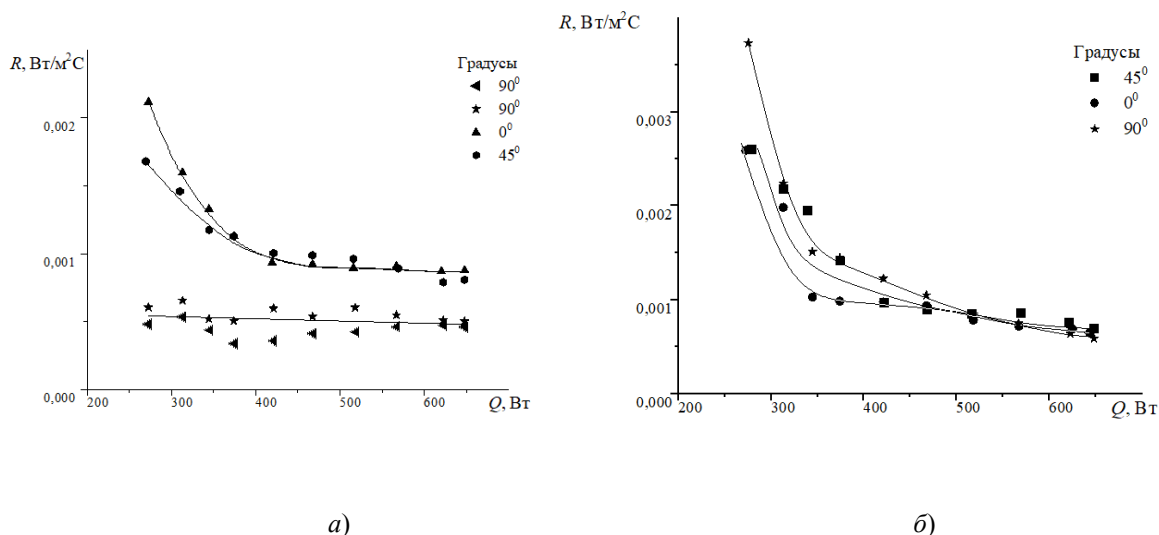


Рис. 3. Зависимость термического сопротивления от подводимого теплового потока:

*a* – классического термосифона, заправленного водой, при углах наклона 0, 45 и 90 град; *б* – для пародинамического термосифона, заправленного водой, при углах наклона 0, 45 и 90 град

Пародинамический термосифон, заправленный дистиллированной водой (рис. 3, б), работает в оптимальном режиме с наименьшим термическим сопротивлением в диапазоне мощностей от  $350 \text{ Вт/м}^2$  и выше и при уменьшении угла наклона до  $0^\circ$ , т. е. в горизонтальном положении термосифона.

#### Литература

1. Noie, S. H. Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon / S. H. Noie // Appl Therm Eng. – 2005. – Vol. 25. – P. 495–506.
2. Кузнецов, Г. В. Режимы смешанной конвекции в замкнутом двухфазном термосифоне цилиндрической формы / Г. В. Кузнецов, М. А. Аль-Ани, М. А. Шеремет // Изв. ТПУ. – 2011. – Т. 318, № 4. – С. 18–23.
3. Jouhara, H. Experimental investigation of small diameter two phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-3283 / H. Jouhara, A. J. Robinson // Applied Thermal Engineering. – 2010. – Vol. 30. – P. 201–211.
4. Sobhan, C. B. A review and comparative study of the investigations on micro heat pipes / C. B. Sobhan, R. L. Rag, G. P. Peterson // Int J Energy Res. – 2007. – Vol. 31. – P. 664–688.
5. Xue, Z. H. High performance loop heat pipe with flat evaporator for energy-saving cooling systems of supercomputers / Z. H. Xue, W. Qu, M. H. Xie // J. Heat Transfer. – 2020. – No. 142 (3): 031901. – 7 p.