

Порядок выполнения эксперимента:

1. Выбирается новый кабель после долгого хранения из сшитого полиэтилена или АПвПу2г – 100–150 м; можно из кусков разного кабеля, тогда в соединителе необходимо сделать отверстие 5–6 мм.

2. В кабеле, находящемся на барабане, измеряется уровень частичных разрядов диагностической системой Megger.

3. Для удаления влаги кабель продувается теплым азотом или воздухом.

4. Измеряются частичные разряды в кабеле.

5. Через кабель пропускается трансформаторное масло.

6. Измеряются частичные разряды в кабеле.

7. При отсутствии частичных разрядов в кабеле концы кабелей герметизируют мастикой и пленкой или устанавливают концевые муфты. Кабель возвращается на барабан для хранения. Периодически один раз в три месяца регистрируются частичные разряды в кабеле.

В заключение отметим следующее:

1. Теоретически обосновано, что в результате сложившейся практики кабели закладываются в землю уже с увлажненной изоляцией, так как бухты хранятся круглый год под открытым небом. В итоге частичные разряды в кабеле регистрируются в первые месяцы эксплуатации кабелей.

2. Проведены эксперименты по определению скорости истечения масла с использованием образцов 7 марок кабелей под атмосферным давлением, а также по определению видов кабеля, подходящих для данного способа восстановления изоляции.

3. Разработана экспериментальная схема для прокачки масла через кабель, расположенный на барабане.

#### Литература

1. Грунтович, Н. В. Способы восстановления изоляции высоковольтных кабелей // Н. В. Грунтович, М. Д. Астапенко // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого. – 2021. – № 4. – С. 58–66.
2. Физический энциклопедический словарь / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Сов. энцикл, 1983. – Т. 4. – 451 с.
3. Грунтович, Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования / Н. В. Грунтович. – Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2013. – 271 с.

### **ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ОРЕБРЕНИЯ ТЕПЛОТДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРОЦЕСС ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ АЦЕТОНА**

**Д. С. Радюк**

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

Научный руководитель Н. А. Вальченко

*Приведены результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении ацетона на горизонтальных трубах, имеющих поперечное оребрение с различной геометрией ребра, в диапазоне тепловых потоков  $q = 2,9–30,1$  кВт/м<sup>2</sup> при атмосферном давлении в кольцевом канале. Определены закономерности влияния профиля ребра на вид кривой кипения.*

**Ключевые слова:** интенсификация теплообмена, оребренная поверхность, кольцевой канал, энергосберегающая технология.

**Экспериментальная установка и методика проведения исследований.** Актуальность исследований определяется широким распространением оребренных поверхностей в промышленности, в связи с их универсальностью для различных теплоносителей, технологичностью изготовления и сборки, возможностью работы на загрязненных теплоносителях. К тому же до настоящего времени нет достаточных широкомасштабных исследований по процессу кипения жидкостей в условиях «стеснения» и затрудненного отвода паровой фазы, что затрудняет расчеты теплопередающей аппаратуры различных энергоустановок.

Экспериментальные исследования проводились на специально созданном экспериментальном стенде кафедры «Промышленная теплоэнергетика и экология» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого».

Геометрические параметры канала и исследованных образцов представлены в таблице, где  $d_o$  – диаметр образца по основной поверхности;  $D_o$  – наружный диаметр ребра;  $d_{вн}$  – внутренний диаметр образца;  $S_p$  – шаг ребра;  $\delta_o$  – толщина основания ребра;  $\delta_b$  – толщина вершины ребра;  $L_o$  – длина образца;  $N_p$  – количество ребер;  $h_p$  – высота ребра;  $F_o$  – площадь основной поверхности;  $F_n$  – полная наружная площадь образца;  $D$  – диаметр кольцевого канала.

Тепловой поток к образцу подводился с помощью электронагревателя от стабилизированного источника постоянного тока. Жидкость в процессе проведения эксперимента подавалась через нижний патрубок в кольцевой канал, а паровая фаза отводилась через верхний патрубок в конденсатор. Необходимое давление в кольцевом канале обеспечивалось конденсатором, поддерживающим уровень давления за счет изменения расхода охлаждающей жидкости.

**Параметры исследованных образцов**

| Тип экспериментального образца | $d_o$ , мм | $D_o$ , мм | $d_{вн}$ , мм | $S_p$ , мм | $\delta_o$ , мм | $\delta_b$ , мм | $L_o$ , мм | $N_p$ , шт. | $h_p$ , мм | $F_o$ , м <sup>2</sup> | $F_n$ , м <sup>2</sup> | $D$ , мм |   |    |        |        |
|--------------------------------|------------|------------|---------------|------------|-----------------|-----------------|------------|-------------|------------|------------------------|------------------------|----------|---|----|--------|--------|
| Полированная трубка            | 25         | –          | 16            | –          | –               | –               | 302        | –           | –          | 0,0237                 | 0,0237                 | 107      |   |    |        |        |
| Технически шероховатая трубка  |            | –          |               | –          | –               | –               |            | –           |            |                        |                        |          |   |    |        |        |
| Параболический профиль ребра   |            | 50         |               | 4          | 4               | 2               |            | 36          | 12,5       | 0,0124                 | 0,0592                 |          |   |    |        |        |
| Прямоугольный профиль ребра    |            |            |               |            |                 |                 |            |             |            | 4                      | 2                      |          | 2 | 47 | 0,0163 | 0,0772 |
| Треугольный профиль ребра      |            |            |               |            |                 |                 |            |             |            | 4                      | 4                      |          | 1 | 36 | 0,0124 | 0,0539 |

Экспериментальные образцы изготавливались из дюралюминия. На поверхности образцов для измерения температурного напора зачеканивались хромель-копелевые дифференциальные термодпары с диаметром проводников не более 0,5 мм. Экспериментальные данные регистрировались и обрабатывались с помощью автоматизированной системы измерений.

**Полученные результаты исследования и их анализ.** В качестве контрольных опытов, были проведены эксперименты по кипению ацетона при атмосферном давлении на технически шероховатой и полированной горизонтальных трубках в диапазоне

тепловых потоков 6–100 кВт/м<sup>2</sup>. Полученные опытные данные подтверждают положительное влияние условий «стеснения» [1, 2].

Экспериментальное исследование теплообмена при кипении ацетона на поперечно оребренных горизонтальных трубах с различной геометрией ребра проведено в диапазоне тепловых потоков  $q = 2,9\text{--}30,1$  кВт/м<sup>2</sup> при атмосферном давлении. Исследовались три типа оребренных поверхностей, со следующими профилями ребра: треугольный, параболический и прямоугольный. Полученные значения плотности теплового потока на оребренных трубах по сравнению с технически шероховатой и полированной трубками имеют меньшие значения. Это объясняется тем, что подводимый от электронагревателя тепловой поток относился к полной поверхности оребренной трубки, которая существенно больше, чем поверхность гладкой и шероховатой трубки:

$$q = \frac{Q}{F_o + F_p}, \quad (1)$$

где  $F_o$  – площадь основной поверхности без оребрения;  $F_p$  – полная площадь ребер.

Соответственно, рассчитывались и коэффициенты теплоотдачи – по среднему температурному напору по образцу:

$$\alpha = \frac{q}{\Delta T_{cp}} = \frac{q}{(\Delta T_o + \Delta T_p)/2}, \quad (2)$$

где  $\Delta T_o$  – средний температурный напор по основной поверхности, не занятой оребрением;  $\Delta T_p$  – средний температурный напор по ребру.

Необходимо отметить, что процесс парообразования (начало кипения) на оребренных поверхностях начинался при значительно более низких температурных напорах и плотностях теплового потока (1–2 и 5 °С, 3 и 6,5 кВт/м<sup>2</sup>, соответственно, рис. 1), что свидетельствует о достаточно высокой эффективности оребренных поверхностей. Средние коэффициенты теплоотдачи для них в 2–3,5 раза выше, чем для полированной трубки (рис. 2).

В то же время характер кривых кипения на оребренных трубках в значительной мере определялся геометрией поверхности [2]. При кипении на трубке с прямоугольным профилем ребра в области малых тепловых потоков 3–15 кВт/м<sup>2</sup> значения коэффициентов теплоотдачи выше нежели на поверхности с параболическим и треугольным профилем ребра. Это связано с уменьшением вертикальной скорости перемешивания жидкости у поверхности образца, более быстрым прогреванием объемов жидкости в межреберных зазорах, что приводит к стабилизации процесса парообразования.

Однако с ростом теплового потока  $q > 11$  кВт/м<sup>2</sup> картина меняется. В этом случае достаточно узкое поперечное сечение прямоугольного оребрения препятствует отводу образовавшейся паровой фазы, что приводит к снижению интенсивности теплоотдачи вследствие запаривания поверхности.

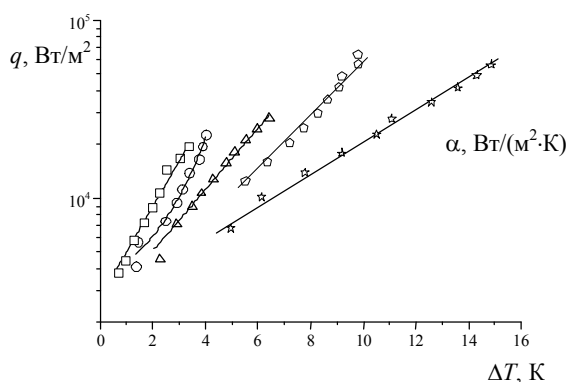


Рис. 1. Экспериментальные зависимости  $\Delta T = f(q)$  при кипении ацетона на трубках с поперечным оребрением при атмосферном давлении

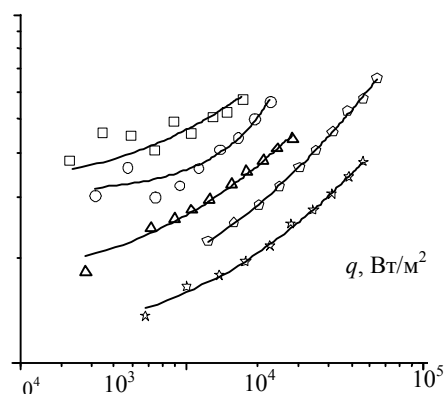


Рис. 2. Экспериментальные зависимости  $\alpha = f(q)$  при кипении ацетона на трубках с поперечным оребрением при атмосферном давлении

На рис. 1, 2 приняты следующие обозначения: ☆ – полированная трубка; ◇ – технически шероховатая трубка; △ – треугольный профиль ребра; ○ – параболический профиль ребра; □ – прямоугольный профиль ребра

Более низкие значения коэффициентов теплоотдачи для трубки с треугольным оребрением можно объяснить, более слабым развитием поверхности теплообмена. К тому же при беспрепятственном отводе прогретой жидкости от оснований ребер значительную роль играет конвективная составляющая теплового потока, отводимого от образца. Действительно, процесс кипения на трубке с треугольным оребрением начинался при более высоких температурных напорах и плотностях теплового потока ( $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $4\text{ кВт/м}^2$ ).

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Экспериментально подтверждено положительное влияние условий «стеснения» на интенсивность теплоотдачи при кипении ацетона на горизонтальных трубках в кольцевом канале.

2. Проведены экспериментальные исследования процесса кипения на трубках с поперечным оребрением. Полученные значения коэффициентов теплоотдачи в 2–3,5 раза превышают аналогичные величины для гладкой поверхности, что говорит о достаточно высокой эффективности исследованного метода интенсификации теплоотдачи.

3. Выявлены закономерности влияния профиля ребра на вид кривой кипения. Определено, что в области малых тепловых потоков ( $2,9\text{--}11\text{ кВт/м}^2$ ) наиболее эффективным является прямоугольное оребрение, а при  $q > 11\text{ кВт/м}^2$  – параболическое.

4. Полученные результаты могут быть использованы при разработке высокоэффективных теплообменных аппаратов, теплопередающие поверхности которых работают в условиях «стеснения».

#### Литература

1. Керн, Д. Развитие поверхности теплообмена : пер. с англ. / Д. Керн, А. Краус. – М. : Энергия, 1977. – 464 с.

2. Кутепов, А. М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании / А. М. Кутепов, Л. С. Стерман, Н. Г. Стюшин. – М. : Высш. шк., 1977. – 352 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНОГО РАЗЪЕДИНИТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА И МИКРООММЕТРА

И. Ю. Микулич, М. С. Манюкевич

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

Научный руководитель Д. И. Зализный

*Рассмотрен лабораторный стенд, созданный на кафедре «Электроснабжение» и позволяющий выполнять измерения сопротивлений контактов и заземления высоковольтного разъединителя РЛНД-1-10П/200 с помощью микропроцессорного микроомметра, также разработанного на кафедре.*

**Ключевые слова:** лабораторный стенд, разъединитель, микроомметр, испытания, потери электроэнергии.

Измерение сопротивлений различных элементов электрических цепей является очень важным для задач энергетика. Особенно на значительных участках линий электропередач наличие даже небольшого сопротивления создает одну из крупнейших проблем передачи электроэнергии – энергетические потери, расходующиеся на нагревание проводников. Поэтому необходимо проводить контроль сопротивления на участках цепи и на различных элементах, например, таких, как высоковольтные разъединители. Для изучения студентами принципов работы и испытаний подобных элементов сети на кафедре «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого был создан лабораторный стенд, имеющий название «Высоковольтный разъединитель» (рис. 1).

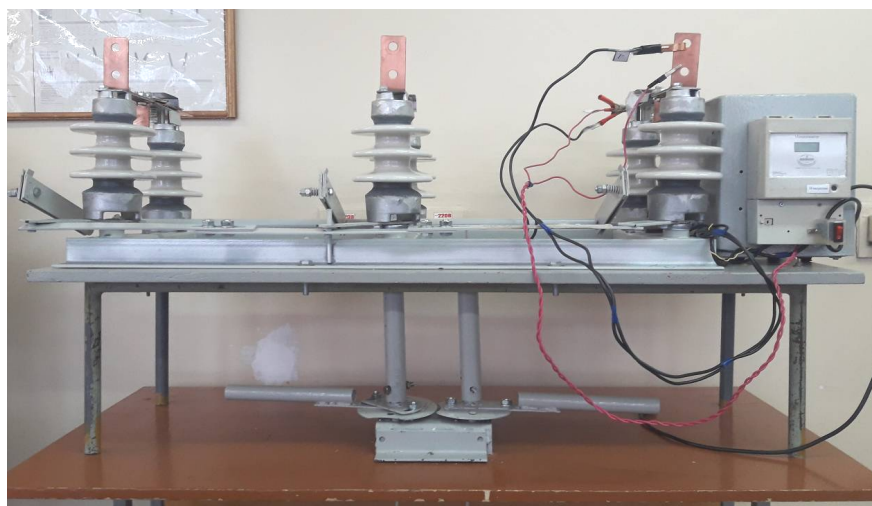


Рис. 1. Внешний вид лабораторного стенда

Основой разработанного стенда является высоковольтный разъединитель РЛНД-1-10П/200, рассчитанный на напряжение 10 кВ и номинальный ток 200 А. Поворот валов контактной системы разъединителя и его системы заземления осуществляется с помощью механического привода ПРНЗ-10.