

гетического аудита, глубокого проникновения в особенности технологических процессов и оптимального использования современных микропроцессорных средств.

Система «электронный преобразователь частоты – короткозамкнутый асинхронный двигатель» в настоящее время является оптимальным техническим решением массового электропривода. Она особенно привлекательна на стадии модернизации предприятия: сохраняется все существующее оборудование, но между сетью и двигателем включается новый элемент – преобразователь частоты.

В настоящее время в мировой практике выполнен большой объем исследований и разработок нового типа электрических машин: вентильно-индукторных двигателей и базирующих на них электроприводов.

Экономия электроэнергии при замене асинхронных двигателей (АД) на ВИД одинаковых мощностей определялась по экономии электрической энергии в год. Исходными величинами являлись следующие: номинальные мощности АД и ВИД, коэффициенты полезного действия АД и ВИД.

Проведенные расчеты показали, что применение ЧРЭП и ВИД в качестве электроприводов различного технологического оборудования являются перспективными направлениями в системах энергосбережения промышленных предприятий.

УДК 621.577.6:536.24

В. И. Володин, проф., д-р техн. наук;  
С. В. Здитовецкая, ст. преп., канд. техн. наук  
(БГТУ, г. Минск)

## **ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ТЕПЛООБМЕНА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕМКОСТНЫХ ТЕПЛОНАСОСНЫХ ВОДОПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ**

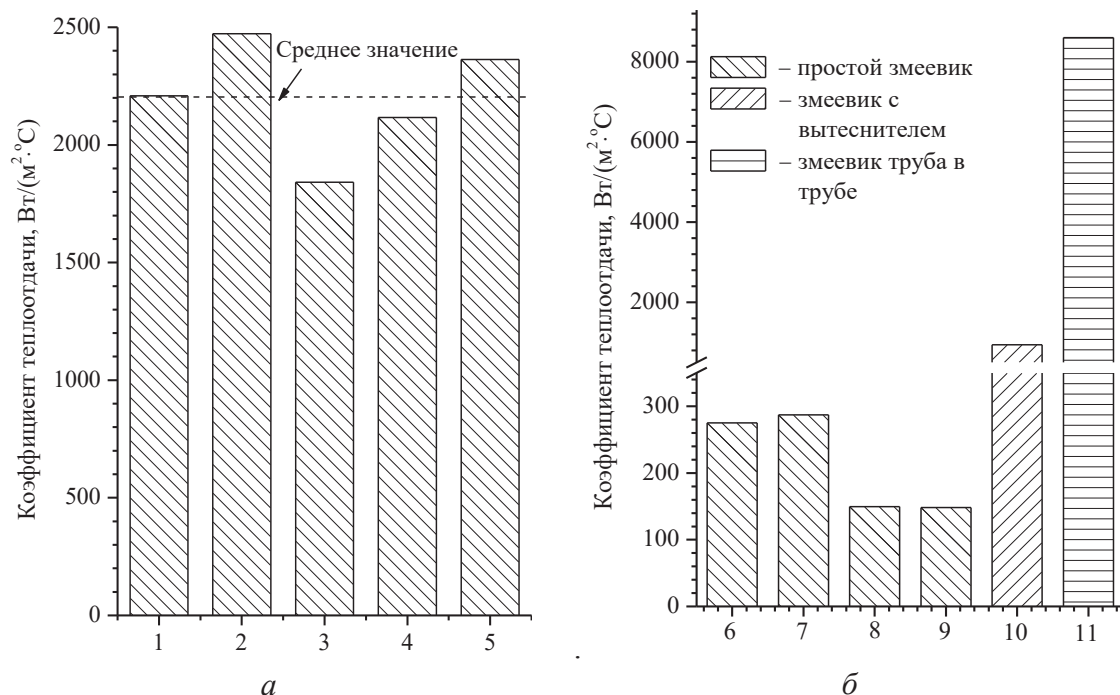
Теплонасосные системы теплоснабжения находят широкое применение и являются экономически целесообразными по сравнению с электрическими или огневыми водонагревателями. В данном исследовании в качестве водонагревателя используется совмещенная конструкция конденсатора и аккумулятора теплоты. Конструктивное решение которого включает теплоизолированный бак с нагревательным элементом в виде спирального змеевика. Внутри змеевика конденсируется хладагент, а отводимая теплота расходуется на нагрев воды.

Анализируются три альтернативных исполнения данного устройства. Первое – включает простой однозаходный спиральный змеевик в объеме жидкости. Второе – включает расположенные осесимметрично змеевик и внутри него вытеснитель, что позволяет увеличить скорость потока воды. Данные конструкции являются традиционными. Третья, предлагаемая конструкция, состоит из змеевика труба в трубе с потоком пара в центральной трубе и нагреваемой воды в кольцевом канале, который также погружен в жидкость.

Тепловое проектирование водоподогревателей требует данных о теплоотдаче, как со стороны конденсирующегося потока хладагента, так и со стороны нагреваемой воды. Анализ показал, что однозначные рекомендации по применению зависимостей для расчета коэффициентов теплоотдачи для рассматриваемой системы отсутствуют. Поэтому в настоящей работе был выполнен предварительный анализ уравнений подобия для расчета коэффициентов теплоотдачи со стороны конденсирующегося потока и нагреваемой воды для рассматриваемых конструктивных решений водоподогревателей.

Численный анализ проводится на примере водонагревателя с тепловым потоком 10 кВт, выполняющего функцию буферной емкости низкотемпературной системы отопления. Объем цилиндрической теплоизолированной емкости аккумулятора теплоты с внутренним диаметром 0,5 м высотой 1,1 м составляет 200 л. Спиральный змеевик выполнен из трубы диаметром 16×1 мм и шагом 18 мм. Змеевик труба в трубе дополнительно включает наружную трубу 27×1 мм. На вход в канал поступает пар хладагента R410A с температурой 85,8°C, давлением 2,4 МПа и расходом 0,047 кг/с. Диаметр простого змеевика и змеевика труба в трубе равен 0,4 м. Диаметр змеевика в конструкции с вытеснителем равен 0,474 м, а диаметр вытеснителя – 0,448×0,001 м. Температура воды на входе в буферную емкость 30°C, а на выходе – 35°C.

Сравнительный анализ зависимостей для расчета теплоотдачи при конденсации хладагента в водонагревателе с змеевиком труба в трубе проводился методом вычислительного эксперимента интегральным методом. Из рисунка видно, что максимальное отклонение от среднего значения коэффициента теплоотдачи 2201 Вт/(м<sup>2</sup>·°C) составляет 16,3% для зависимости Акерса [1]. Для дальнейшего анализа использовалась зависимость Бойко-Кружилина [1] с отклонением 12,4%, которая позволяет рассчитывать среднюю теплоотдачу при конденсации хладагентов в широком диапазоне изменения сухости пара на входе и выходе конденсатора.



**Рисунок – Значения коэффициентов теплоотдачи при конденсации хладагента (а) и нагревании воды (б) для корреляций: 1 – Чейто; 2 – Бойко-Кружилин; 3 – Акерс; 4 – Кавалини; 5 – ЦКТИ; 6 – ФЭИ-Жукаускас; 7 – Кулинченко; 8 – ЦКТИ; 9 – Нада; 10 – ЦКТИ; 11 – Петухов**

Особенностью водонагревателя с простым змеевиком является низкая скорость потока воды, а соответственно и невысокие значения коэффициентов теплоотдачи (столбцы 6–9), которые являются определяющими в теплопередаче. Необходимо отметить отсутствие адекватных данных по теплоотдаче со стороны нагреваемой воды для такой конструкции. Зависимости ФЭИ-Жукаускаса и Кулинченко [2] для вынужденного потока не учитывают шаг витков змеевика, зависимость ЦКТИ [3] не учитывает характер потока. Зависимость Нада [4] учитывает эти факторы для смешанной конвекции, но она получена для конкретного сочетания конструктивных параметров теплообменника и требует подтверждения для их широкой области изменения.

Добавление вытеснителя повышает теплоотдачу в несколько раз, и она становится сравнимой с данными по конденсации (столбец 10). Предлагаемая конструкция с погруженным змеевиком труба в трубе позволяет достичь максимального значения коэффициента теплоотдачи, полученного по зависимости Петухова [5] со стороны воды (столбец 11), а соответственно и коэффициента теплопередачи.

Сравнение массогабаритных характеристик конструкций емкостных теплонасосных водоподогревателей показало, что минимальная высота змеевикового спирального нагревателя 0,406 м достигается при

использовании конструкции труба в трубе. В конструкции с вытеснителем, высота змеевика 0,522 м. В случае простого змеевика – 1,64 м, что не соответствует емкости аккумулятора теплоты и требует более длительной работы теплового насоса для нагрева воды до требуемой температуры при ее многократной циркуляции. Масса водоподогревателя труба в трубе также имеет минимальное значение 17,04 кг. Суммарная масса змеевика совместно с вытеснителем равна 27,03 кг, а простого змеевика – 42,28 кг.

Таким образом, в качестве буферной емкости целесообразно использовать водоподогреватель со змеевиком труба в трубе, который обладает наилучшими массогабаритными характеристиками.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Santa R. The Analysis of two-phase condensation heat transfer models based on the comparison of the boundary condition // Acta Polytechnica Hungarica. – 2012. – Vol. 9. No. 6. – P. 167–180.
2. Кириллов, П. Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / П. Л. Кириллов, Ю. С. Юрьев, В. П. Бобков; под общ. ред. П. Л. Кириллова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
3. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС. Методические указания: РД 24.035.05-89. – Л.: НПО ЦКТИ, 1991. – 211 с.
4. Performance enhancement of shell and helical coil water coolers using different geometric and fins conditions / S.A. Nada [et. al.] // Heat Transfer – Asian Research. – 2016. – Vol. 45(7). – P. 631–647.
5. Петухов Б. С., Генин Л. Г., Ковалев С. А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. – Москва: Изд-во МЭИ, 2003. – 548 с.