

этих зонах, а также дроблением частиц износа вследствие сильной локализации деформации.

Библиографический список

1. **Эксплуатация** и ремонт колесных пар вагонов / А. Ф. Богданов, В. Г. Чурсин. – М. : Транспорт, 1985. – 270 с.

2. **Ресурс** и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог : монография / ред. проф. И. А. Иванов. – М. : ИНФРА-М, 2011. – 264 с.

3. **Структурные** изменения в ободьях железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания / Ю. Н. Таран, В. П. Есаулов, С. И. Губенко // Известия вузов. Черная металлургия. – 1989. – № 9. – С. 101–105.

4. **Повышение** износостойкости железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания / Ю. Н. Таран, В. П. Есаулов, С. И. Губенко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 2. – С. 42–44.

5. **О природе** износа поверхностей металлов при трении / Е. А. Марченко. – М. : Наука, 1979. – 118 с.

6. **Петрография** неметаллических включений / Т. И. Литвинова, В. П. Пирожкова, А. К. Петров – М. : Металлургия, 1972. – 460 с.

7. **The Delamination Theory of Wear** / N. P. Suh // Wear. – 1973. – V. 23, n 1. – P. 111–124.

8. **Физико-химическая** механика материалов / В. И. Лихтман, Е. Д. Щукин, П. А. Ребиндер. – М. : Изд-во Академии наук СССР, 1962. – 303 с.

9. **Прочность** стали в коррозионной среде / Г. В. Карпенко. – М. ; Киев : Машгиз, 1963. – 187 с.

10. **Теория** и методы исследования коррозии металлов / Г. В. Акимов. – М. : Изд-во Академии наук СССР, 1945. – 195 с.

11. **Микрогеометрия** и контактное взаимодействие поверхностей / Я. А. Рудзит. – Рига : Зинатне, 1975. – 210 с.

12. **Неметаллические** включения в стали / С. И. Губенко, В. В. Парусов, И. В. Деревянченко. – Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2005. – 536 с.

13. **Трансформация** неметаллических включений в стали / С. И. Губенко. – М. : Металлургия, 1991. – 225 с.

14. **Неметаллические** включения и качество стали / Г. И. Бельченко, С. И. Губенко. – Киев : Техника, 1980. – 168 с.

УДК 621.313.5; 621.365.9

К. К. Ким

Петербургский государственный университет путей сообщения

С. Н. Иванов

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

М. А. Шпилев, А. А. Ткачук, Н. Ю. Куличенко

Петербургский государственный университет путей сообщения

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРООТОПЛЕНИЯ

Повышение эффективности производства и снижение себестоимости конечной продукции может быть достигнуто за счёт внедрения новых технических устройств, к которым можно отнести электромеханические перекачивающие устройства на основе теплогенерирующих электромеханических преобразователей энергии (ТЭМП).

электроотопление, электромеханический преобразователь, обмотка, цилиндр.

Введение

Выбор направлений «Энергосбережение и энергосберегающие технологии» и «Создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления тепла и электроэнергии» в качестве приоритетов развития науки и техники определяет одну из наиболее важных и сложных задач при создании специального энергетического оборудования – электротехнических устройств транспортного назначения и систем управления генерацией тепловой энергией и транспортированием теплоносителя, не только обеспечивающих возможность экономичного и точного поддержания заданных эксплуатационных показателей, но и отвечающих современным требованиям электробезопасности, надежности и технологичности.

Задача модернизации и развития промышленного комплекса России в направлении ресурсо- и энергосбережения, сокращения потерь энергии на всех стадиях производства продукции является острой и весьма актуальной для сегодняшнего дня. Повышение эффективности производства и снижение себестоимости конечной продукции может быть достигнуто за счет внедрения новых технических устройств, к которым можно отнести электротехнические перекачивающие устройства на основе теплогенерирующих электромеханических преобразователей энергии (ТЭМП).

Целесообразность их использования подтверждается сравнительным анализом нагревательных систем, показывающим, что в ТЭМП обеспечивается возможность совмещения в одном устройстве функций приводного, передаточного и исполнительного механизмов, обуславливающих существенное улучшение технико-экономических показателей. Кроме этого, электротехнические перекачивающие устройства на основе теплогенерирующих электромеханических преобразователей характеризуются возможностью самого точного регулирования мощности электронагрева непосредственно в месте потребления от нескольких ватт до сотен киловатт, экологической чистотой, безопасно-

стью, относительно низкими капитальными затратами, отсутствием необходимости использования протяженных тепломагистралей (а следовательно, низкими теплопотерями), мобильностью и т. д.

Многотарифная система оплаты за электроэнергию еще более повышает целесообразность применения электронагрева. Это особенно актуально в регионах Сибири и Дальнего Востока, длительность отопительного сезона для которых составляет более 220 суток в год, причем существует достаточно большой период, при котором объем теплопотребления на горячее водоснабжение и отопление не требует номинальной нагрузки крупных ТЭЦ и приводит к существенному снижению их эффективности [1].

Для технического обоснования целесообразности применения ТЭМП, которые хотя и являются логическим развитием электронагревательных устройств трансформаторного типа [2], но выгодно отличаются от последних повышенными коэффициентом теплоотдачи и теплопроизводительностью, рассмотрим их конструкцию и принцип действия (рис. 1).

1 Устройство ТЭМП

Устройство состоит из наружного кожуха 1, отделенного от магнитопровода с уложенной в нём сетевой обмоткой 2, зазором 3 и двух короткозамкнутых вторичных обмоток, выполненных из электропроводящего материала, – неподвижной 4 и вращающейся 5, имеющей, например, форму полого цилиндра, на внутренней поверхности которого сформированы и жестко связаны с ней напорные лопасти 6. Обмотка 2 уложена в пазы статора, разделенные зубцами.

В статоре выполнены осевые каналы произвольной формы 7 (на рисунке 1 каналы 7 в поперечном сечении имеют форму окружности). Прокачиваемая среда поступает через входной патрубок 8, циркулирует внутри неподвижной обмотки 4, по осевым каналам произвольной формы 7 и между внешней поверхностью магнитопровода и внутренней

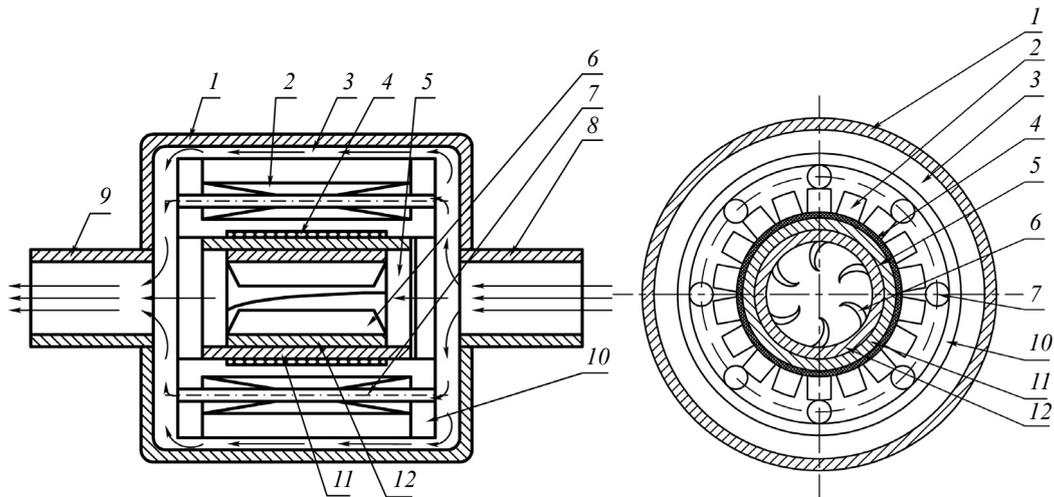


Рис. 1. Электромеханический преобразователь для нагрева и перемещения жидкой среды

поверхностью наружного кожуха 1 и отводится через выходной патрубок 9.

Вращающаяся вторичная обмотка и магнитопровод разделены элементом из самосмазывающегося неэлектропроводящего материала 10, выполняющего функцию подшипника скольжения и обеспечивающего свободное вращение подвижной обмотки 5 в тангенциальном направлении, но ограничивающего ее осевое перемещение относительно магнитопровода с первичной обмоткой 3 и неподвижной обмоткой 4. Вращающаяся обмотка 5 выполнена в виде двух коаксиальных цилиндров 11 и 12, неподвижных друг относительно друга, причем наружный цилиндр 11 состоит из электропроводящего немагнитного материала, а внутренний 12 – из ферромагнитного, при этом на внутренней поверхности внутреннего цилиндра закреплены напорные лопасти 6. Толщина внутреннего ферромагнитного цилиндра 12 выбирается равной расчетной ширине зубца статора, длина составляет 0,30...0,70 длины наружного немагнитного цилиндра 11.

2 Моделирование

Для проектирования ТЭМП наиболее эффективным на сегодняшний день является пакет ELCUT 5.8. Причем моделирование температурных полей в элементах ТЭМП

с использованием последней версии пакета ELCUT 5.8 позволяет решать связанную тепловую задачу, источники тепла для которой предварительно определяются в результате расчета магнитного поля переменных токов.

Выбор типа решаемой задачи производится на первом этапе. При моделировании ТЭМП базовой задачей является расчет электромагнитного поля переменных токов. Решение этой задачи позволяет определить распределение мощности тепловыделения в нагревательных элементах, которая средствами пакета переформулируется в задачу нестационарного теплообмена для расчета процесса нагрева. На этом же этапе выбирается класс модели (геометрические свойства модели). Исследуемый электромеханический теплогенератор геометрически моделируется телами вращения, благодаря чему при решении задачи в двумерной постановке решение фактически находится для трехмерной задачи.

Создание геометрической модели является фактически повторением чертежа ТЭМП. Отдельным геометрическим элементам (блокам, ребрам, границам блоков, отдельным узлам (для задания граничных условий)) модели присваиваются метки, необходимые для связи между геометрическими объектами и моделями физических свойств этих объектов. Физические свойства материалов (электропроводность, магнитная проницае-

мость, теплопроводность и т. д.) задаются в окне свойств метки блока. Существенно, что для тепловых задач ELCUT позволяет задавать нелинейные свойства материалов (зависимость теплопроводности от температуры). Нагрузки (величины токов, мощности тепловыделения и т. д.) также задаются в окне свойств метки блока. Величина тока в обмотке задается в графе «Источники поля». Граничные условия (величины потенциалов поля на границах расчетной области, значения температур на границах и т. д.) задаются в окне свойств меток ребер.

В ТЭМП величина магнитного потенциала на границе расчетной области и за ее пределами принимается равной нулю. Решение задачи в программе ELCUT представляет собой визуализацию поля какой-либо из искомых переменных. Для электромагнитной задачи это может быть индукция, напряженность магнитного поля, плотность тока, мощность тепловыделения и т. п. Для тепловой задачи искомыми величинами являются поля температур, градиент температур, поле теплового потока. Решение нестационарной (динамической) тепловой задачи дает картину теплового поля для каждого момента времени.

Следует отметить, что сопоставление результатов численных и натурных экспериментов, приведенное в работах, посвященных анализу действия электрических машин разных типов, в которых в качестве среды программирования используется ELCUT [3], позволяет допустить замену трехмерной геометрии электрической машины «плоской» (двумерной), соответствующей анализу плоскопараллельного поля, в котором отсутствует изменение источников поля и, следовательно, самого поля в направлении продольной оси z в декартовой системе координат. На рисунке 2 последовательно показаны реализации автоматизированного проектирования, численного моделирования и физического конструирования теплогенерирующего преобразователя.

В основу оценки эффективности использования ТЭМП может быть положена зависимость потерь на перемещение жидкой среды

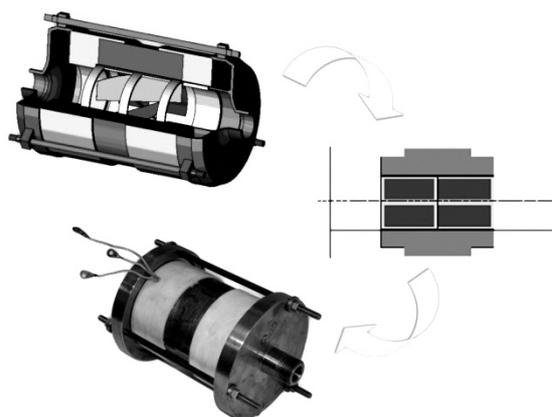


Рис. 2. Последовательность «3D-модель – 2D-модель – ТЭМП»

от температуры, что обеспечивает снижение мощности условного приводного двигателя за счет подогрева перекачиваемой среды при ее транспортировке.

Расчетная схема ТЭМП, включенного в технологическую магистраль, приведена на рисунке 3.

На схеме показано, что гидравлические потери на перемещение, связанные со сни-

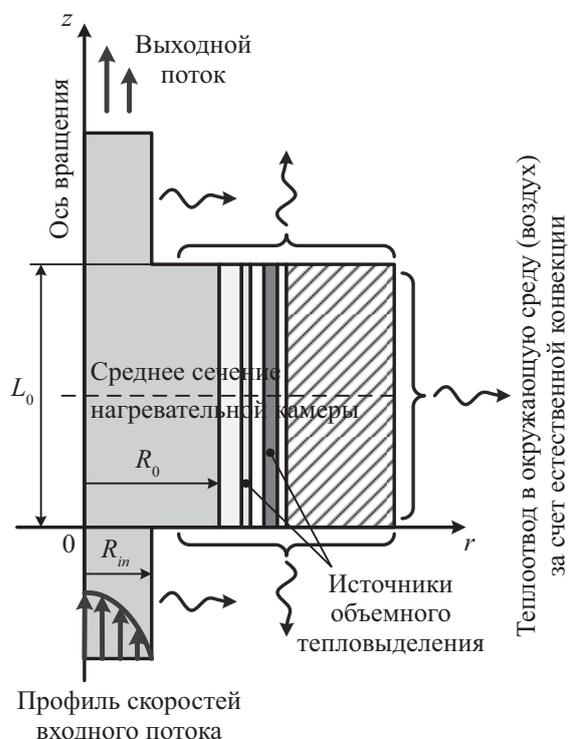


Рис. 3. Схема для расчета тепловых и гидродинамических процессов

жением развиваемого устройством давления, определяются в виде четырех слагаемых:

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4,$$

где P_1 – потери на входе; P_2 – потери в рабочей области; P_3 – потери на выходе; P_4 – потери в трубопроводе.

Рассчитываемые потери представляют собой затраты энергии на преодоление местных гидравлических сопротивлений различных участков теплогенератора и магистрали. Потери давления на этих сопротивлениях зависят от квадрата средней скорости потока и могут быть определены по формуле Вейсбаха [4]:

$$\Delta P = \xi \times \frac{\eta}{\nu} \times \frac{v^2}{2}, \quad (1)$$

где ξ – коэффициент сопротивления гидравлического трения; η – динамическая вязкость, Па·с; ν – кинематическая вязкость, м²/с; v – средняя скорость потока, м/с.

При турбулентном движении коэффициент сопротивления зависит от шероховатости труб N , образующих магистраль, значения которой в зависимости от материала и состояния труб приведены в таблице.

В основе количественной оценки снижения гидравлических потерь лежит известная зависимость параметров перемещаемой среды, учитываемых формулой (1), от температуры.

На рисунке 4 в качестве примера приведена зависимость динамической вязкости сырой нефти от ее температуры.

ТАБЛИЦА. Значения шероховатости

Вид труб и их состояние	N , мм
Цельнотянутые трубы из латуни, меди и свинца, новые, технически гладкие	0,02
Те же трубы после нескольких лет эксплуатации	0,25
Стальные трубы новые, не бывшие в употреблении	0,2
Те же трубы после нескольких лет эксплуатации, умеренно коррозированные	0,4
Те же трубы с отложением накипи	1,5

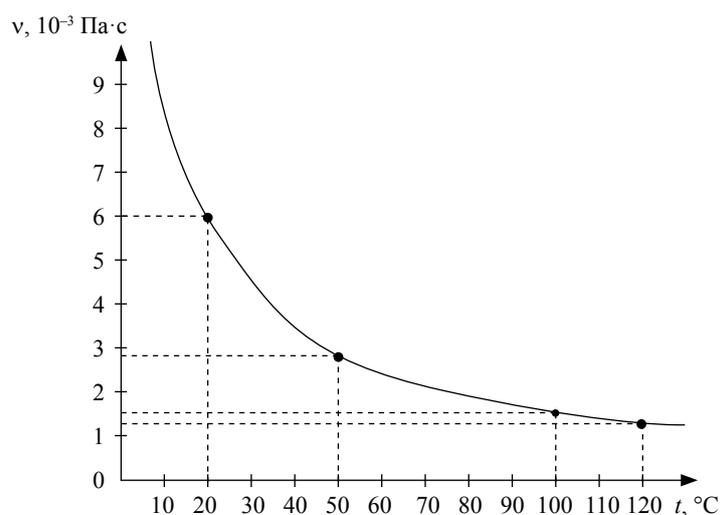


Рис. 4. Зависимость вязкости сырой нефти от ее температуры

Основная сложность точного определения местных сопротивлений в формуле (1) связана с тем, что при этом необходимо учитывать не только температуру, но и характер поля скоростей нагреваемой среды в расчетной области, визуализация которого для опытного варианта ТЭМП приведена на рисунке 5 (d – толщина внутреннего ферромагнитного магнитопровода).

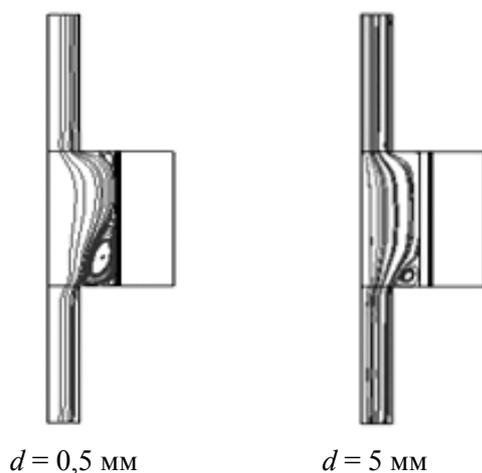


Рис. 5. Характерная картина поля скоростей в расчетной области

Полученные результаты подтверждают: даже приближенное сравнение потерь при использовании ТЭМП вместо стандартного оборудования показывает, что их величина существенно снижается и позволяет снизить установленную мощность используемого оборудования, т. е. улучшить технико-экономические показатели рассмотренных систем.

Заключение

Следует отметить, что именно от степени использования в процессе разработки, производства и эксплуатации ТЭМП интегрированных систем автоматизированного проектирования на основе CALS-технологий, обеспечивающих высокие технико-экономические показатели продукции на всех стадиях жизненного цикла изделия, зависят перспективы внедрения электронагревательных устройств на основе электромеханических преобразователей в энергетические системы.

Библиографический список

1. **Экономическая** целесообразность электроотопления / А. И. Елшин [и др.] / Образование, наука и производство: проблемы, достижения и перспективы : материалы международной научно-технической конференции «Электротехнические системы и комплексы». – Комсомольск-на-Амуре, 21–22 октября 2010 г. : в 5 т. Т. 3 / Редкол.: А. М. Шпилев (отв. ред.) и [др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – С. 190–196.
2. **Электронагревательные** устройства трансформаторного типа / В. М. Кузьмин. – Владивосток : Дальнаука, 2001. – 143 с.
3. **ELCUT**. Программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.elcut.ru> (дата обращения 26.10.12).
4. **Тепловые**, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах / Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. – М. : Высшая школа, 1989. – 239 с.