

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ШНЕКОВОГО ЭЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И НАГРУЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Заблудский Н.Н., к.т.н., доц.

Донбасский государственный технический университет

Украина, 94204, Луганская обл., Алчевск, пр. Ленина 16, ДонГТУ, каф. "Электрические машины и аппараты"
тел. (06442) 2-05-64, факс (06442) 2-68-87, e-mail: info@dgmi.edu.ua

Досліджені процеси теплообміну та тертя при взаємодії електротепломеханічних перетворювачів енергії з навантажувально-охолоджуючим середовищем.

Исследованы процессы теплообмена и трения при взаимодействии электротепломеханических преобразователей энергии и нагрузочно-охлаждающей среды.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционно охлаждающую среду электрических машин рассматривают как среду с бесконечно большой теплоемкостью, не создающую ощутимого нагрузочного момента [1, 2]. При этом экономичность системы охлаждения оценивается по количеству энергии, затрачиваемой на циркуляцию охлаждающих сред, а джоулевы потери в проводниках, потери на перемагничивание и вихревые токи в магнитных проводящих массах, потери трения роторов, составляющие в различных типах машин 10...30%, необратимо путем теплообмена удаляются в пространство. С появлением нового класса электротепломеханических преобразователей энергии (ЭТМП) технологического назначения был внесен ряд новых представлений о взаимодействии преобразователя и технологической среды [3, 4]. Полифункциональность ЭТМП, непосредственный контакт наиболее нагретой части с перерабатываемым материалом дает возможность использования энергии диссипации для нагрева и сушки материала. Более того, энергия, в том числе механическая, передается непосредственно материалу без дополнительных механизмов редукции. Вместе с тем, при создании ЭТМП необходимо установить реальные механические и тепловые нагрузки, которые формируются технологической средой и воздействуют на вращающуюся часть ЭТМП, при заданных параметрах технологического режима (производительность, начальная и конечная влажность и температура, гранулометрический состав продукта и др.). В настоящее время исследования подобных процессов в известных публикациях отсутствуют.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель приведенных в данной работе исследований – определение температурных и механических характеристик нагрузочно-охлаждающей среды в пограничных слоях изотермических поверхностей шнекового ЭТМП.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рабочий слой перерабатываемого материала расположен между двумя изотермическими стенками, нагретыми, в общем случае, до разных температур. На рис. 1 показана схема распределения взаимодействующих потоков сыпучего материала и воздушного

теплого агента, сформированного внутри шнекового ЭТМП (статор условно не показан).

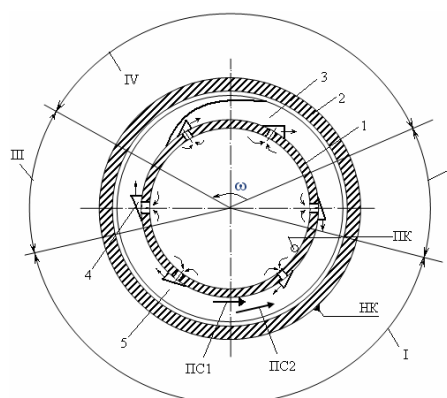


Рис. 1. Схема распределения потоков нагрузочно-охлаждающей среды ЭТМП:

I – ламинарная область; II – переходная область встречных струй материала и воздуха; III – переходная область "кипящего слоя"; ПС1 – пограничный слой ротора; ПС2 – пограничный слой дна; 1 – массивный ротор; 2 – днище шнека; 3 – винтовая лопатка ротора; 4 – осевая лопатка ротора; 5 – сыпучий материал

В пограничном слое ПС, прилегающем к поверхности массивного ротора, создаются условия для возникновения закрученного вихревого потока теплового воздушного агента и материала, одновременно снижающего турбулентное трение. Экспериментально образование вихревого потока установлено путем измерения проводимости слоя графитового потока в следующих режимах работы шнекового ЭТМП: неподвижное состояние ротора ($s = 1$) и отсутствие нагнетания теплового агента; вращение ротора с угловой частотой $\omega = 11,5$ рад/с при нагнетании воздушного теплового агента. При вращающемся роторе ЭТМП и работе вентиляционной сети нагнетания отмечено (в 5 – 6 раз) снижение активного сопротивления графитового слоя в сравнении с режимом неподвижного ротора и отсутствия вдува теплового агента. Контроль величины активного сопротивления производился мостом постоянного тока, при этом функции электродов выполняли элементы конструкции ЭТМП – ротор и днище, на которых располагались подвижный (ПК) и неподвижный (НК) контакты. Исследова-

ние процессов в закрученном вихревом потоке связаны со значительными сложностями, так как корректное аналитическое описание двухкомпонентного, а иногда и трехкомпонентного, закрученного потока отсутствует. В связи с этим в данной работе выяснение влияния отдельных режимных и конструктивных параметров проводилось с помощью численного моделирования, позволяющего учитывать как теоретические зависимости, так и эмпирические данные, полученные из натуральных исследований.

Математическая модель реализована в виде комплекса программ: уравнения движения воздушного теплового агента, расписанные по трем составляющим в цилиндрической системе координат, дополненные эмпирическими зависимостями обратного влияния сыпучего материала на воздушный поток; уравнение движения твердой частицы материала с учетом взаимодействия с воздушным потоком и отскока от лопаток шнека и поверхности ротора; уравнения сложного теплообмена между частицей и воздушным потоком; уравнение кинетики сушки частицы.

В работе изучен процесс ламинарно-турбулентного перехода и локальных характеристик ПС2. Температура регистрировалась с помощью микротермометрического зонда, изготовленного из медь-константановых проволок диаметром 30 мкм с градуировочной характеристикой, $E = \varepsilon_1(100 - T_x) + \varepsilon_2(T_r - 100)$ где $\varepsilon_1 = 0,0042$, $\varepsilon_2 = 0,053$; T_x , T_r – соответственно температура холодного и горячего слоев. Для регистрации полей скорости использован термоанемометр постоянной мощности с верхней границей частотного диапазона 10 кГц. Чувствительным элементом служила нить из платинированного вольфрама диаметром 2,2 мкм и длиной 0,33 мм, приваренная к датчику 55A22 фирмы DISA. Независимость сигнала от температуры движущейся среды (температурная компенсация) обеспечивалась введением в измерительную цепь термопары регулируемой ЭДС от независимого источника, равной по численному значению и противоположной по знаку ЭДС термопары при выключенном нагревателе.

Статистическая обработка мгновенных значений температур проводилась с использованием пакета программ для спектрального анализа случайных процессов.

Для установления корреляции пространственной формы движения материала с изменением локального коэффициента теплоотдачи проводилось экспериментальное определение коэффициента теплоотдачи с изотермических поверхностей ЭТМП методом стационарного теплового потока. Коэффициент теплоотдачи α на малой площадке ΔF может быть найден, если измерен температурный напор $(T_1 - T_2)$ и мощность ΔP , отводимая средой (перерабатываемым материалом) с поверхности в стационарном тепловом режиме:

$$\alpha = \frac{\Delta P}{\Delta F(T_1 - T_2)}. \quad (1)$$

Источником тепловыделения служит сама исследуемая поверхность с известной мощностью тепловыделений. Для измерения температурного перепада

использован пассивный измеритель на термопарах, представляющий одиночную дифференциальную термопару, в которой константановая пластинка служит одновременно дополнительной стенкой и электродом.

В настоящей работе исследована эволюция температурных пульсаций в ПС у стенки дна шнекового ЭТМП как по нормам к стенке (координата y), так и вдоль нее (координата x). В соответствии с рис. 1 в ПС вдоль окружности дна можно выделить четыре области: ламинарную; переходную зону встречных струй материала и воздуха; переходную зону "кипящего слоя"; турбулентную.

На рис. 2 показаны среднеквадратичные значения пульсаций температуры σ_T в ПС у дна шнека, полученные для названных областей движения материала при разности температур изотермических стенок $\Delta T = 60^\circ\text{C}$.

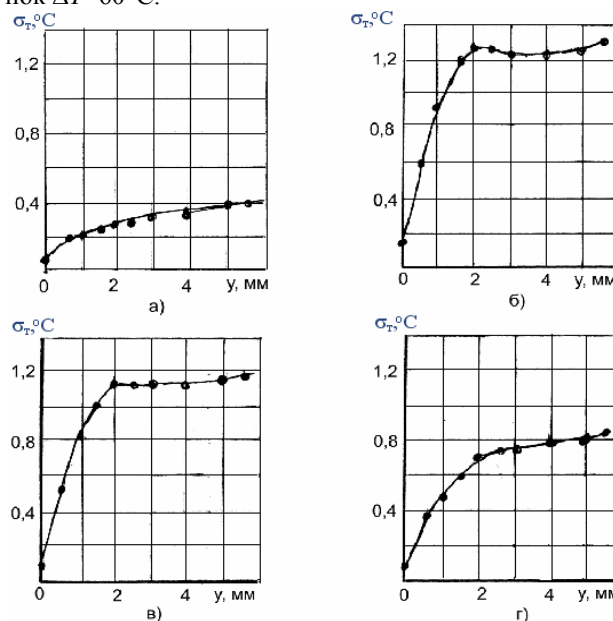


Рис. 2. Распределение среднеквадратических пульсаций температуры в пограничном слое по окружности дна шнекового ЭТМП: а) ламинарная область; б) переходная область встречных струй материала и воздуха; в) переходная область "кипящего слоя"; г) турбулентная область

Графический материал рис. 2 указывает на то, что в пределах ламинарной области ПС заметные температурные пульсации появляются лишь при увеличении расстояния по нормам от стенки дна и формируются в основном действием осевых лопаток ротора ЭТМП.

Максимальные значения температурных пульсаций отмечаются в переходных областях, где ламинарное движение материала переходит в конвективно-турбулентное.

На рис. 3 представлены фрагменты отдельных аналоговых реализаций температурных пульсаций, полученных в переходной области "кипящего слоя" на различных расстояниях от стенки дна шнека ЭТМП. Число Релея Ra , характеризующее механизм возникновения конвекции, при этом находилось в диапазоне $Ra = 3,12 \cdot 10^8 - 6,9 \cdot 10^8$.

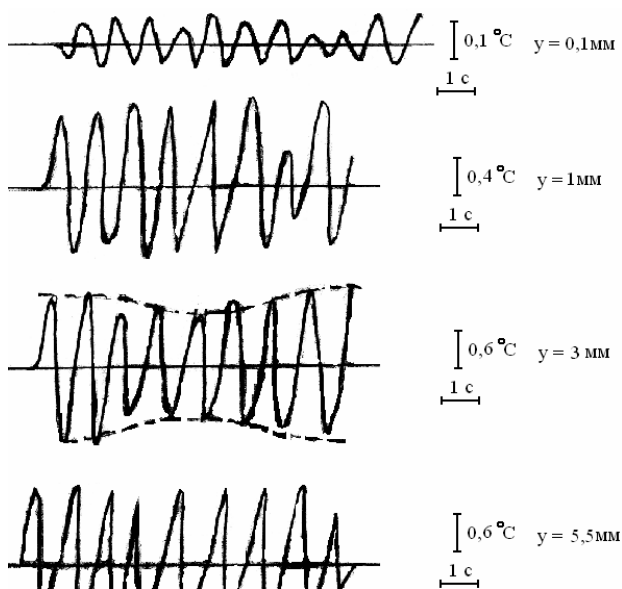


Рис. 3. Фрагменты аналоговых сигналов при изменении пульсаций температуры

Информацию о частотном распределении пульсаций целесообразно представить в виде нормированных на дисперсию частотных спектров мощности S температурных пульсаций, полученных на фиксированном ($y=3$ мм) расстоянии от стенки днища шнекового ЭТМП. Спектры измерены во всех областях вдоль окружности ротора. Частотные спектры мощности пульсаций температуры представлены на рис. 4.

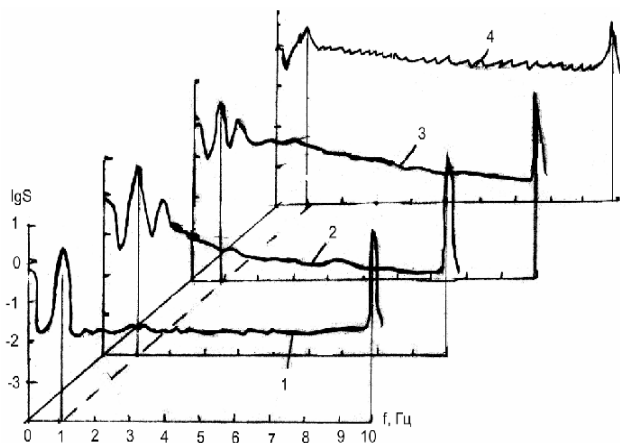


Рис. 4. Частотные спектры мощности пульсаций температуры: 1 – ламинарная область; 2) переходная область встречных струй материала и воздуха; 3) переходная область "кипящего слоя"; 4) турбулентная область

Из рис. 4 следует, что в температурных пульсациях выделяются характерные частоты, амплитуды этих пульсаций изменяются случайным образом, а минимальные значения пульсации имеют вблизи стенки днища шнекового ЭТМП. Наиболее интенсивные пульсации температуры наблюдаются на частотах 1,1 Гц и 10 Гц. Частота 1,1 Гц соответствует термогравитационному механизму возникновения конвекции, а частота 10 Гц формируется принудительной

конвекцией, создаваемой осевыми лопатками ротора-шнека и воздушными струями теплового агента. Кривая 4 на рис.4 отражает сплошной спектр мощности пульсаций, характерный для турбулентного режима.

Локальный коэффициент теплоотдачи α в различных областях ПС исследован для двух перепадов температур между изотермическими поверхностями шнекового ЭТМП: $\Delta T=100^\circ\text{C}$ (более нагрет массивный ротор); $\Delta T=60^\circ\text{C}$ (более нагрето днище шнека).

На рис. 5 представлена зависимость локального коэффициента теплоотдачи от днища шнека для ламинарной, переходной и турбулентных областей при $\Delta T=60^\circ$.

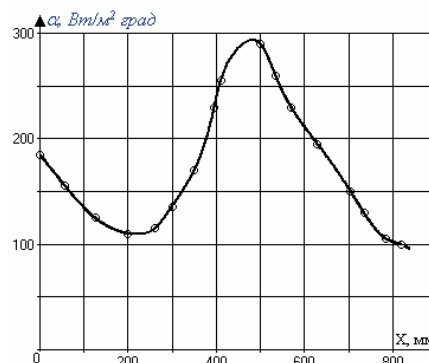


Рис. 5. Локальный коэффициент теплоотдачи в различных областях движения материала в шнековом ЭТМП

Как видим, перестройка пространственной формы течения (движения) материала коррелирует с изменением локального коэффициента теплоотдачи. Заметьного максимума коэффициент теплоотдачи достигает в переходной области как для зоны "кипящего слоя", так и в зоне встречных струй материала и воздуха.

На рис. 6 приведена в безразмерной форме зависимость теплоотдачи нагретой стенки днища шнека в ламинарной и начальной части переходной области.

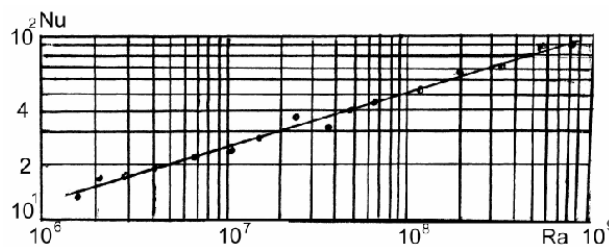


Рис. 6. Безразмерные локальные коэффициенты теплоотдачи в зависимости от числа Рейля

В переходной области ПС на расстоянии $y=3$ мм от стенки днища шнека (см. рис. 6) наблюдается амплитудная модуляция пульсаций температуры основной частоты ($f=10$ Гц) термогравитационной частотой $f=1,1$ Гц.

На рис. 7 представлены экспериментальные данные максимальных значений окружной компоненты скорости потока материала в различных областях ПС на расстоянии $y=5$ мм от стенки днища. Минимальные значения скорости наблюдаются в ламинарной области (самая низкая точка окружности днища шнека) и в турбулентной области (самая верхняя точка окружности днища шнека). Более высокая скорость воздушно-

го теплового агента (55 м/с) в сравнении с окружной скоростью осевых лопаток (0,3 м/с), неполное заполнение шнека материалом (коэффициент заполнения $\varphi=0,55$), очевидно, формируют условия для резкого снижения окружной скорости материала и даже изменения ее знака по отношению к направлению вращения шнека.

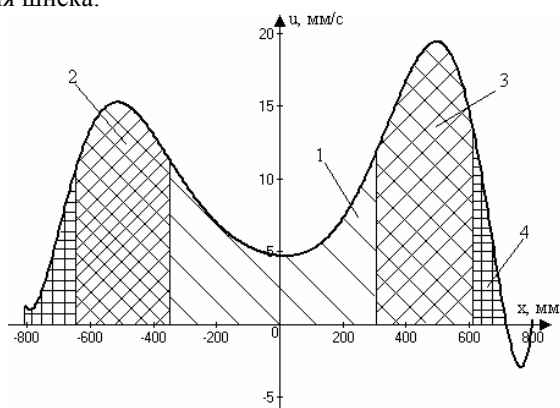


Рис. 7. Максимальные значения окружной компоненты скорости потока материала в различных областях ПС: 1 – ламинарная область; 2) переходная область встечных струй материала и воздуха; 3) переходная область "кипящего слоя"; 4) турбулентная область

Измерения характеристик трения и массообмена без внесения существенных возмущений в ПС1 проводились с применением датчиков трения, измерение пульсаций давления – пьезокерамическими датчиками с приемной поверхностью диаметром 1,5 мм. На рис. 8 представлены изменения касательных напряжений трения τ вдоль стенок и вдоль прилегающих поверхностей слоев материала, перемещаемых шнеком и не вовлеченных в вихревые потоки.

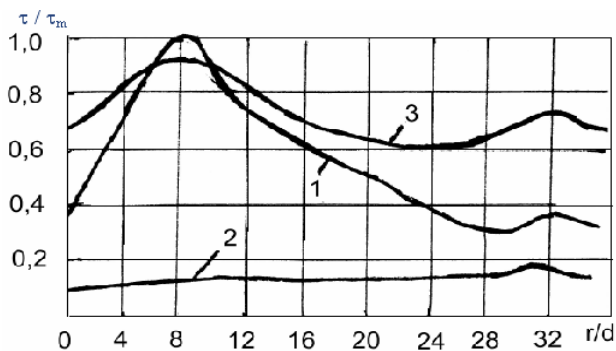


Рис. 8. Распределение трения в ПС1 шнекового ЭТМП: $d = 5$ мм – диаметр сопла; τ_m – максимальное значение трения в данном сечении; $Re = 4,2 \dots 7,5 \cdot 10^4$ – критерий Рейнольдса; r – расстояние между смежными осевыми лопатками

Кривая 1 на рис. 8 представляет собой изменение трения в зоне шнека, заполненной материалом, кривая 2 – в верхней зоне шнека; кривая 3 – трение вдоль поверхности прилегающего слоя материала в зоне, заполненной материалом.

Основной максимум касательных напряжений трения располагается на расстоянии $0,25r$, второй максимум – вблизи смежной осевой лопатки.

Задача о течении в окрестности критической точки имеет достаточно точное решение [5].

Касательное напряжение на стенке при этом определяется выражением:

$$\tau = 1,312 K_{н.п.} \rho \beta_c \sqrt{\beta_c \nu r}, \quad (2)$$

где r – радиальная координата; ν – кинематическая вязкость; ρ – плотность двухкомпонентной среды; $K_{н.п.}$ – коэффициент, учитывающий неравномерность профиля скорости.

Значение коэффициента β_c можно определить по формуле:

$$\beta = 0,44 u_0 / r_0, \quad (3)$$

где u_0 – скорость истечения из сопла; r_0 – начальный радиус струи.

ВЫВОДЫ

1. Получены локальные коэффициенты теплоотдачи в различных областях движения материала в шнековом ЭТМП, касательные напряжения на стенке, а также безразмерные коэффициенты теплоотдачи, которые позволяют оценить работу ЭТМП в различных областях потоков материала.

2. Получены зависимости распределения среднеквадратических отклонений пульсаций температуры в пограничном слое, частотное распределение пульсаций температуры в различных областях перемешивания сыпучего материала.

3. Определены максимальные значения окружной компоненты скорости потока материала в различных областях пограничного слоя, что дает возможность сформировать условия изменения скорости материала в различных областях, возникающих при работе шнекового ЭТМП.

4. Результаты исследований являются основополагающими для получения и исследований температурных и механических характеристик нагрузочно-охлаждающей среды в пограничных слоях изотермических поверхностях шнекового ЭТМП.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Филиппов И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. – М.: Энергия, 1974 – 383 с.
- [2] Копылов И. П. Электрические машины: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк.; Логос, 2000 – 607 с.
- [3] Пат. 50242 Україна. МКИ 7 F 26B17/18, 3/347. Шнековый сушильный аппарат/ М.М. Заблодський, В.Ф. Шинкаренко, В.С. Плюгін та інш. – № 8244; Заявл. 03.12.2001; Опубл. 17.01.2005. Бюл. № 1 – 3 с.
- [4] Пат. 75771 Україна. МПК (2006) H 05B/10. Заглибний електронагрівач/ М.М. Заблодський, В.Ф. Шинкаренко, В.С. Плюгін та інш. – № 5162; Заявл. 29.06.2004; Опубл. 15.05.2006. Бюл. № 5 – 3 с.
- [5] Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 540 с.

Поступила 30.08.2006