

## НЕЛИНЕЙНОСТЬ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ШНЕКОВОГО ЭЛЕКТРОТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Заблудский Н.Н., к.т.н., доц.

Донбасский государственный технический университет

Украина, 94204, Луганской 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.

*Запропонована фізична модель формування тепломеханічних навантажень та розглянуті умови виникнення автоколебаний у системі з в'язким тертям для шнекового електротепломеханічного перетворювача.*

*Предложена физическая модель формирования тепломеханических нагрузок и рассмотрены условия возникновения автоколебаний в системе с вязким трением для шнекового электротепломеханического преобразователя.*

### ВВЕДЕНИЕ

Электротепломеханические преобразователи (ЭТМП) и системы на их основе, относящиеся к новому классу электромеханических преобразователей энергии, предназначены для осуществления целого ряда технологических процессов в различных отраслях промышленности [1, 2]. Однако моделирование динамических режимов и создание инженерных методик расчета ЭТМП сдерживается отсутствием достоверных закономерностей и характеристик действующих на ЭТМП нагрузок. В настоящее время такие закономерности установлены лишь для ЭТМП, работающих в резервуарах с легкоплавким веществом [3]. Цель работы – установление характера тепломеханических нагрузок, которые испытывает шнековый ЭТМП при работе с сыпучими и вязкими материалами.

### ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛОМЕХАНИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Принципы функционирования и формирования выходных характеристик модульного шнекового ЭТМП рассмотрены в [4], где рабочая среда (сыпучий материал) рассматривается как элемент электротепломеханической системы. Физическая модель формирования тепломеханических нагрузок в потоке транспортируемого материала представлена на рис. 1.

Процесс движения сыпучего или вязкого материала в рабочей зоне шнекового ЭТМП подчинен основным законам механики деформируемых сред. Изменение массы материала в любом объеме равно ее потоку через поверхность, окружающую этот объем

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность материала;  $\partial/\partial x$ ;  $\partial/\partial y$ ;  $\partial/\partial z$  – проекции скорости материала в этой точке на оси координат.

Связь локальных и конвективных изменений плотностей материала с изменениями скоростей при смещении от данной фиксированной точки устанавливается по следующему выражению:

$$\theta = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_x}{\partial z}$$

Изменение количества движения материала в малом фиксированном объеме равняется потоку количества движения через поверхность, окружающую этот объем, сложенному с массовыми и поверхностными силами, приложенными к этому объему

$$\begin{aligned} p \left( \frac{\partial v_k}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_k}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_k}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_k}{\partial z} \right) = \\ = \rho G_k - \frac{\partial p}{\partial k} + 2 \frac{\partial}{\partial k} \left( \mu \frac{\partial v_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial t} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial v_k}{\partial x} \right) \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial t} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_m}{\partial k} + \frac{\partial v_k}{\partial m} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial k} \mu \theta \end{aligned} \quad (3)$$

где  $k, l, m = x, y, z$ ;  $\mu$  – вязкость материала;  $G_k$  – проекция объемной силы на ось  $k$ .

Изменение полной энергии, состоящей из критической и внутренней энергий, равно потоку кинетической и внутренней энергий в фиксированном малом объеме через поверхность, окружающую этот объем, и тепловому потоку через эту же поверхность, сложенному с работой напряжений над этим объемом:

$$\begin{aligned} p \left( \frac{\partial E}{\partial t} + v_x \frac{\partial E}{\partial x} + v_y \frac{\partial E}{\partial y} + v_z \frac{\partial E}{\partial z} \right) = \varepsilon - p\theta + \\ + \frac{1}{A} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + \dot{A} \end{aligned} \quad (4)$$

где  $E$  – внутренняя энергия единицы массы;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала;  $\varepsilon$  – приток тепла за единицу времени в единице объема вследствие причин, отличных от теплопроводности (например, конвективный поток горячего воздуха, лучеиспускание);  $A$  – термический эквивалент работы;  $\dot{A}$  – диссипативная функция, представляющая собой тепловую энергию, выделенную при прохождении вихревых токов в массивном роторе и днище шнека (температура  $T_1$  и  $T_2$  на роторе,  $T_3$  – на днище соответственно), а также механическую работу сил вязкости, выделившуюся необратимо в виде тепла в единице объема материала за единицу времени.

Общая задача энергетического анализа и определения тепломеханических нагрузок при сушке и транспортировке материала сводится к совместному решению уравнений (1) – (4). Ввиду нелинейности дифференциальных уравнений (3) и затруднений в поиске общего решения системы уравнений необходимо использовать приближенные методы решений. Существенно упростить решение возможно при рассмотрении не объемной, а плоской задачи. Сложность решения системы (1) – (4) заключается еще и в аномально-вязком поведении транспортируемого материала, объясняемое наличием структур, продолжительность жизни которых определяется термодинамическими условиями.

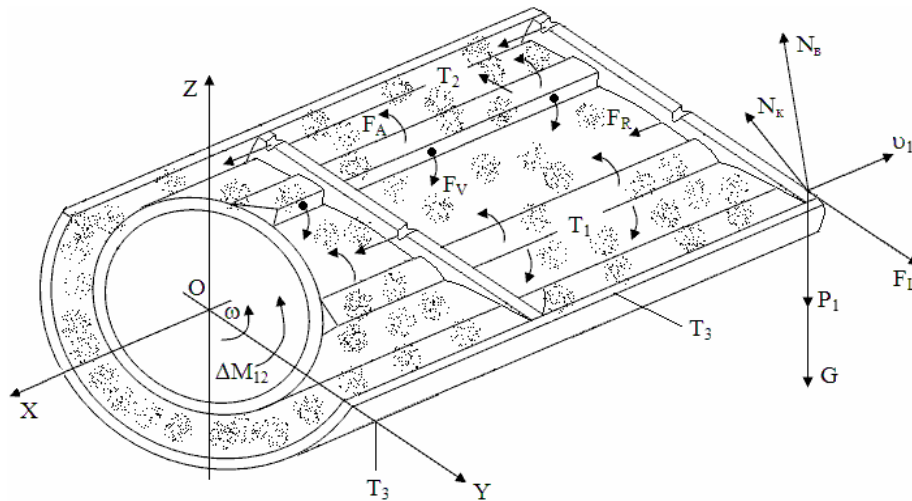


Рис. 1. Физическая модель формирования тепломеханических нагрузок в потоке транспортируемого материала

В нашем случае температура материала будет изменяться при движении в направлении  $X$ . При этом изменение температуры на  $10 - 15$  °C влечет за собой заметное изменение вязкости в  $1,3 - 1,4$  раза. Однако последовательная цепь шнековых ЭТМП, обычно используемая в технологических процессах сушки и нагрева продукта, дает возможность рассматривать процесс с разбиением на отдельные участки, где можно решать изометрическую задачу.

Специфичность материала (например, гетерогенность угольных шламов) требует критического анализа традиционных допущений по условиям ламинарного потока движения материала и условий применения.

Движение частиц материала в шнековом ЭТМП будет происходить, когда сила трения вызванная действующей на частицу центробежной силой  $(P_1 + G)v_y^2 / g^r$ , оказывается настолько большой, что притормаживает частицу в совместном вращении с шнеком со скоростью  $\omega$  по действию разностного электромагнитного момента  $\Delta M_{12}$ . При этом указанная сила заставляет проскальзывать частицу по шнеку, преодолевая силу трения о шнек  $\mu(G + P_1) \cos(\alpha + \gamma)$  и составляющую силы тяжести  $G$  и "силы положения"  $P_1$ . Сила положения учитывает стесненность движения и эффект подпора, вызванный реакцией корпуса  $N_k$ , реакцией винтовой поверхности  $N_e$  и силой  $F_R$  при обратном движении материала через пазы в винтовых лопатках. В приведенных выражениях:  $(\alpha + \gamma)$  – угол подъема частицы на радиусе  $r$  точки соприкосновения частицы с винтовой поверхностью. В зоне между винтовыми лопатками расположены осевые лопатки, создающие дополнительный эффект перемешивания материала за счет силы  $F_A$  и турбулентный эффект силы напорных струй воздуха  $F_v$ . При этом реактивная сила  $F_v$  суммируется по действию с электромагнитным моментом ЭТМП.

В качестве моделей дополнительного гидродинамического воздействия, устанавливающих функциональную связь между силой указанного воздействия напорных струй воздуха, конструктивными и режимными параметрами принято семейство полиномиальных четырехмерных линейных и нелинейных моделей множественной регрессии  $1 \dots 6$  порядков

$$\bar{y} = F_{2g}(d, L, p) = \sum_{i=0}^k b_i d^{I_i} L^{J_i} p^{G_i}, \quad (5)$$

где  $F_{2g}$  – сила гидродинамического воздействия воздушной струи на транспортируемый материал;  $d$  – начальный диаметр струи;  $L$  – расстояние от отверстия до материала;  $p$  – начальное давление струи;  $b_i$  – коэффициенты уравнения множественной регрессии ( $i = 0, 1 \dots k$ );  $I_i$ ;  $J_i$ ;  $G_i$  – показатели степени при независимых переменных уравнения регрессии;  $k$  – число членов уравнения регрессии.

Разработано семейство полиномиальных четырехмерных линейных и нелинейных моделей множественной регрессии управляемого технологического воздействия, устанавливающее функциональную связь между значениями кинематического коэффициента трения материала по рабочим поверхностям шнеков и параметрами рабочей зоны ЭТМП:

$$f = F(R_a, P_f, W) = \sum_{i=0}^k b_i R_a^{I_i} P_f^{J_i} W^{G_i}, \quad (6)$$

где  $f$  – кинематический трения материала по рабочим поверхностям шнеков;  $R_a$  – параметр шероховатости рабочих поверхностей шнеков;  $P_f$  – давление материала на рабочие поверхности шнеков;  $W$  – влажность транспортируемого материала.

Кинематическую схему механической части ЭТМП можно представить в следующих видах:

- одномассовой системы на холостом ходу (рис. 2, а);
- двухмассовой системы, работающей с переменной жесткостью  $C_{12}$  и переменным моментом инерции  $J_2$  вязкой массы в режиме запоминания (рис. 2, б);
- двухмассовой системы с постоянными  $C_{12}$  и  $J_2$  при основном режиме работы (рис. 2, в);
- двухмассовой системы с постоянными  $C_{12}$  и  $J_2$  в режиме освобождения шнека (рис. 2, г);
- двухмассовой системы с стартовой жесткостью  $C_{12} = \infty$ , переходящей в систему с конкретным значением жесткости  $C_{12}$  и соответствует переходному режиму от скрепленной застывшей массой поверхности шнека и днища к очистке размолотой массы в шнеке (рис. 2, д).

Коэффициент жесткости  $C_{12}$  содержит две составляющие, связанные с соотношением нагрузки упругой связи и деформацией по вращательному и поступательному перемещениям.

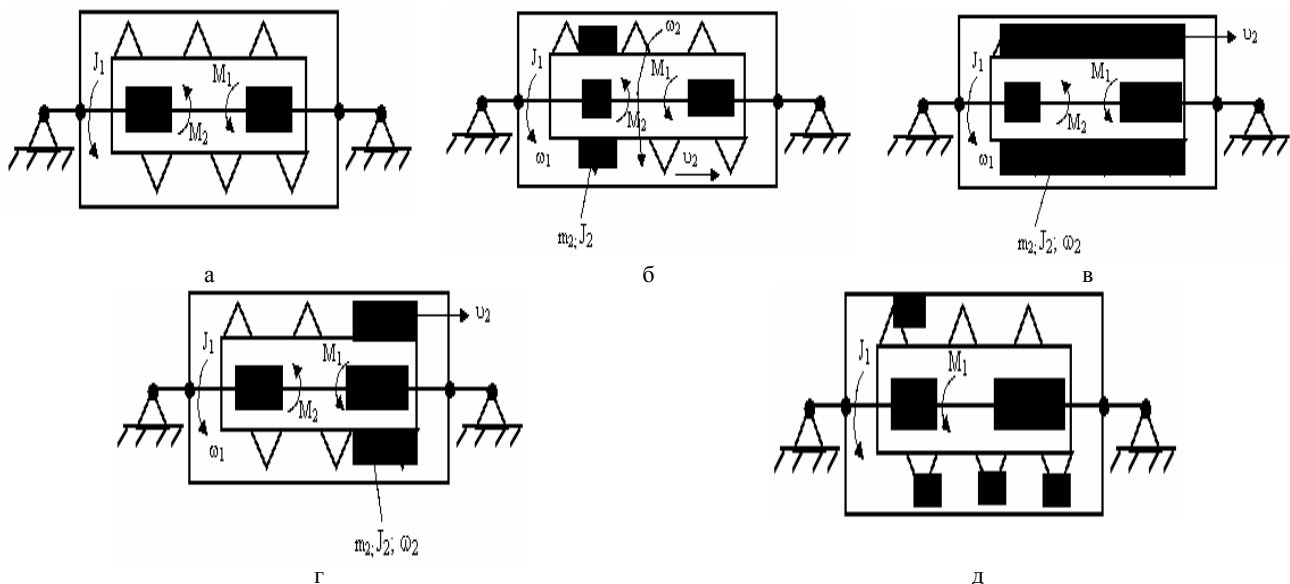


Рис. 2. Кинематическая схема ЭТМП

Характерной чертой физической модели движения склонных к "связыванию" частиц материала в шнековом ЭТМП является эффект внутреннего "срыва". Последнее обстоятельство выражается в эффекте проскальзывания. В пределе явление конгломерации затухает и происходит устойчивое движение сыпучего материала подобно гайке на винту.

Другой характерной особенностью физической модели является так называемый "стартовый" режим, когда начальное вращение шнека становится невозможным из-за скрепления застывшим застывшим материалом всех элементов шнека. В этом случае электропитание получает только ведущий силовой модуль ЭТМП, развивающий момент около 600 Н\*м. Длительность этого процесса составляет 0,3 – 0,5 с. затем система автоматически обеспечивает подключение ведомого силового модуля и ЭТМП далее работает в нормальном режиме противовключения модулей с частотой вращения 80 об./мин.

Обе указанные особенности выражаются сложной нелинейной механической характеристикой "падающий" участок, на котором увеличение скорости шнека сопровождается снижением момента нагрузки.

Установлено, что в подобных системах возникают автоколебательные режимы [5]. В "стартовом" режиме ЭТМП фрикционные автоколебания способствуют разрушению связей застывшей массы материи с рабочими поверхностями шнека. Однако длительное (более 0,5 с) удерживание режима автоколебаний приводит к значительным механическим колебаниям всей системы и тем самым снижается её надежность. При положительном коэффициенте вязкого трения происходит демпфирование возникающих в механической системе ЭТМП упругих колебаний путем выведения из нее колебательной энергии в виде тепловых потерь. Знакопеременная функция диссипации и является необходимым условием существования автоколебательного режима нелинейной системы.

Ранее в [6] установлено образование высших гармоник в воздушном зазоре ЭТМП из-за синусоидального изменения температуры ротора шнека и соответствующих пульсаций удельного активного сопротивления и магнитной проницаемости материала ротора.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана физическая модель формирования тепломеханических нагрузок и кинематическая схема ЭТМП, учитывающая распределение сил положения, гидродинамических и управляемых технологических воздействий.
2. Установлено, что электромеханическая система ЭТМП является нелинейной системой в части механических и тепловых нагрузок.
3. Нелинейность тепломеханических нагрузок ЭТМП и наличие "падающего" участка механической характеристики приводит к возникновению автоколебательных режимов, требующих синтеза соответствующих структур управления.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Патент України № 39226, 7Н05В 6/10. Заглибний електронагрівач //Заблудський М.М., Верімієнко В.І.-Бюл. № 5, част. 1.-2001.
- [2] Пристрій для видалення парафіну зі стінок нафтогазових свердловин // Заблудський М.М., Дорофєєв В.М., Захарченко П.І., Шинкаренко В.Ф., Плюгін В.Є. та ін. – Промислова власність. – Бюл. № 9, 2002.
- [3] Заблудський Н.Н., Захарченко П.І., Плюгін В.Є. Математичне моделювання процесів тепломасообміну і гідродинаміки вращаючогося електромеханічного нагрівача // Вестник НТУ "ХПІ", Тем. вып. Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. - № 16. – С. 77 – 80.
- [4] Заблудський Н.Н. Формування вихідних характеристик багатомодульної електромеханічної системи // Електротехніка і електромеханіка. – 2003. - № 4. – С. 32 – 35.
- [5] Клепиков В.Б., Осичев А.В. Определение границ устойчивости электроприводов с вязким трением с учетом упругости кинематической цепи // Электричество. – 1989. - № 1. – С. 36 – 41.
- [6] Заблудський Н.Н. Формування спектра вищих гармоник в воздушном зазоре електромеханічного преобразователя // Вестник НТУ "ХПІ". – 2002. - № 14. – С. 22-27.

Поступила 30.08.2004