

## ЭНЕРГЕТИКА

УДК 662.76 (045)

В. Н. Диденко, доктор технических наук, профессор  
Е. М. Кашин, выпускник аспирантуры  
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ЗАТРАТ ЭНЕРГИИ НА ПРИВОД ГАЗОГЕНЕРАТОРА РОТОРНОГО ТИПА

*Статья посвящена разработке методики оценки величины относительных затрат энергии на привод газогенератора роторного типа, работающего в установившемся (длительном) режиме газификации твердого топлива. По разработанной методике определен предел отношения затрат энергии на работу газогенератора к энергии от сжигания получаемого генераторного газа.*

**Ключевые слова:** газогенератор роторного типа, затраты энергии, энергия от сжигания газа.

Отличительной особенностью газогенератора роторного типа, разработанного авторами [1–3], является размещение топлива во вращающемся роторе. Вращение ротора осуществляется от отдельного

привода, как правило, электрического, и требует затрат энергии от внешнего источника. Принципиальная схема такого газогенератора представлена на рис. 1.

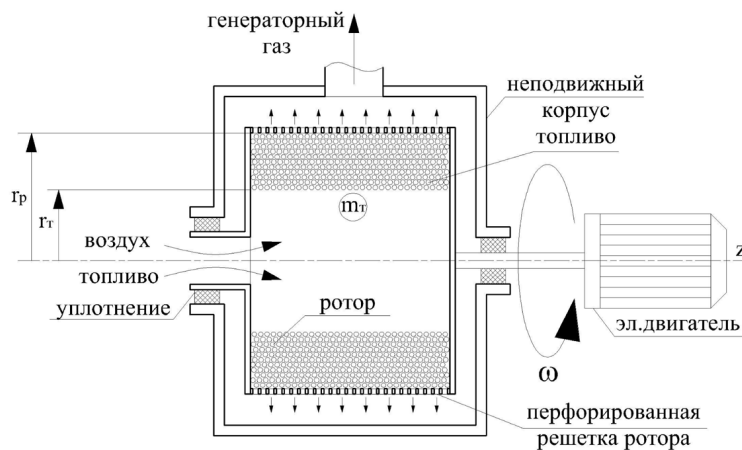


Рис. 1. Принципиальная схема газогенератора роторного типа с горизонтальной осью вращения

Загрузка топлива в ротор газогенератора производится без его остановки, т. е. ротор постоянно вращается с номинальным числом оборотов  $n_{\text{ном}} = \text{const}$  в течение всего времени работы газогенератора.

При пуске газогенератора затраты энергии на раскрутку ротора без топлива от нулевой до номинальной частоты вращения носят единичный характер и поэтому в данном исследовании не учитываются.

Целью исследования является определение общего для всех роторных газогенераторов отношения предельных затрат энергии на привод ротора газогенератора к энергии, получаемой от сжигания вырабатываемого генераторного газа.

Номинальная мощность, потребляемая электродвигателем привода ротора в длительном режиме, в общем случае определяется соотношением:

$$N = N_{\text{ст}} + \Delta N_{\text{дин}} = \frac{\omega_{\text{ном}}}{\eta_{\text{эд}}} (M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}}), \quad (1)$$

где  $\omega_{\text{ном}}$  – угловая скорость вращения вала электродвигателя в номинальном режиме;  $\eta_{\text{эд}}$  – КПД электродвигателя;  $M_{\text{ст}}$ ,  $N_{\text{ст}}$  – статический момент и мощность, необходимые для преодоления сил трения во вращающихся частях газогенератора;  $M_{\text{дин}}$ ,  $\Delta N_{\text{дин}}$  – динамический момент и изменение мощности, обусловленные изменением во времени момента инерции и угловой скорости вращающихся частей газогенератора.

Из основного закона динамики вращательного движения вокруг оси:

$$M_{\text{дин}} = \frac{d}{dt} (J_z \cdot \omega), \quad (2)$$

где  $J_Z, \omega$  – момент инерции и угловая скорость вращения системы вокруг оси  $Z$ ;  $t$  – время.

На рис. 2 представлены типичные механические характеристики электродвигателей переменного тока (синхронных и асинхронных) и электродвигателей постоянного тока с независимым возбуждением.

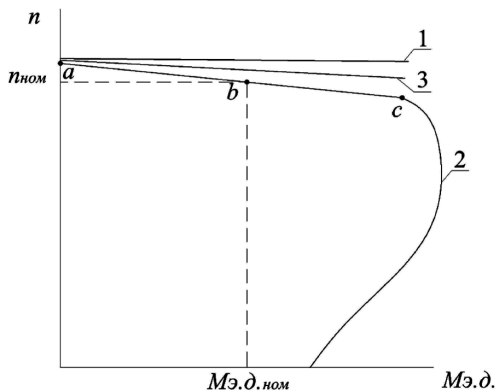


Рис. 2. Механические характеристики электродвигателей различных типов: 1 – синхронный переменного тока; 2 – асинхронный переменного тока; 3 – постоянного тока с независимым возбуждением;  $n$  – число оборотов в минуту вала электродвигателя;  $M_{эд}$  – крутящий момент на валу электродвигателя

Как следует из рис. 2, электродвигатели различных типов по-разному реагируют изменением числа оборотов на изменение момента на валу. Так, по сравнению с асинхронными электродвигателями, синхронные и постоянного тока с независимым возбуждением практически не изменяют числа оборотов. Но асинхронные электродвигатели обладают рядом существенных преимуществ, определяющих их предпочтительное применение в приводах роторных газогенераторов: простота конструкции и обслуживания, низкая стоимость и надежность. Естественная характеристика асинхронного двигателя является «жесткой», т. е. частота вращения на участке  $a-b-c$  (рис. 2) мало зависит от момента на валу, что также относится к достоинствам этих электродвигателей.

При обеспечении номинального режима работы асинхронного двигателя на «жесткой» характеристике можно с достаточной точностью полагать, что

$$\frac{\partial \omega_{ном}}{\partial M_{эд}} \cong 0 \tag{3}$$

и, соответственно, из (2):

$$M_{дин} = \omega_{ном} \frac{dJ_Z}{dt} \tag{4}$$

Таким образом, создание динамического момента на валу электродвигателя привода роторного газогенератора, работающего в номинальном длительном режиме, определяется изменением во времени момента инерции  $J_Z$  его вращающихся частей:

$$J_Z = J_{ZP} + J_{ZT}, \tag{5}$$

где  $J_{ZP}$  – момент инерции всех элементов конструкции ротора;  $J_{ZT}$  – суммарный момент инерции частиц топлива, находящихся внутри ротора:

$$J_{ZT} = \sum_{i=1}^n r_i^2 m_i, \tag{6}$$

где  $m_i, r_i$  – масса и расстояние до оси вращения  $i$ -й частицы;  $n$  – общее количество частиц.

Значения  $n, m_i, r_i$  зависят от времени, т. к. в процессах газификации топлива изменяются загрузки.

Из уравнений (5) и (6):

$$\frac{dJ_Z}{dt} = \frac{d}{dt} (J_{ZP} + J_{ZT}) = \frac{d}{dt} \left( \sum_{i=1}^n r_i^2 m_i \right). \tag{7}$$

Электродвигатель для сохранения  $\omega = const$  при загрузке частиц топлива во вращающийся ротор увеличивает  $M_{эд}$  на величину динамического момента

$M_{дин}$ , при этом мощность  $N$ , потребляемая электродвигателем, возрастает. Перемещение частиц топлива в роторе под действием центробежных сил при газификации, наоборот, приводит к уменьшению  $M_{эд}$  и, соответственно, к уменьшению  $N$ .

Для оценки предельных значений затрат энергии на привод газогенератора, работающего в номинальном режиме, авторами рассматривается гипотетическая циклограмма процесса, на которой загрузка в ротор всей порции топлива и его газификация осуществляются во времени последовательно, причем время равномерной загрузки в ротор всей массы топлива, вмещающейся в него  $m_t^{max}$ , равно времени полной газификации этой массы  $t_t$ .

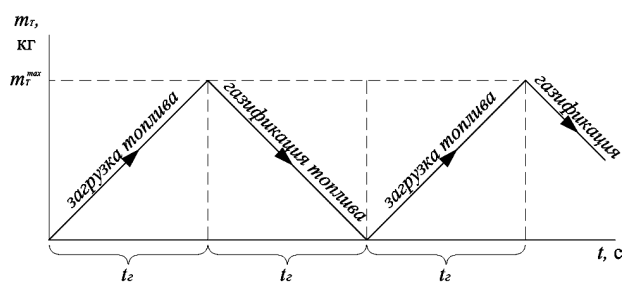


Рис. 3. Гипотетическая циклограмма процесса работы газогенератора в номинальном режиме

Как допущение полагается, что момент инерции частиц топлива с суммарной массой  $m_t$  равен моменту инерции толстостенного кольца с постоянной плотностью  $\rho_t$  и массой  $m_t$ :

$$J_{ZT} = \frac{1}{2} m_t (r_p^2 + r_t^2), \tag{8}$$

где  $m_t = \sum_i^n m_i$ ;  $r_p$  – радиус ротора;  $r_t$  – радиус внутренней поверхности кольца из частиц топлива (рис. 1).

Величина  $r_t$  уменьшается при загрузке от  $r_p$  до  $r_t^{\max}$ , а при газификации увеличивается от  $r_t^{\max}$  до  $r_p$ . При  $r_t = r_t^{\max}$   $m_t = m_t^{\max}$ .

Из совместного решения уравнений (7), (8) и уравнения для массы кольца получено:

$$\frac{dJ_z}{dt} \cong r_t^2 \frac{dm_t}{dt}.$$

Исходя из принятой циклограммы процесса при равномерной загрузке топлива:

$$\frac{dm_t}{dt} \cong \frac{m_t^{\max}}{t_r}$$

и

$$\frac{dJ_z}{dt} \cong r_t^2 \frac{m_t^{\max}}{t_r}. \quad (9)$$

Максимальная скорость увеличения момента инерции  $J_{zT}$  будет в начале процесса загрузки топлива, когда  $r_t = r_p$ .

Тогда из (4) максимальное значение динамического момента, дополнительно создаваемого электродвигателем для поддержания  $\omega = \text{const}$ , при равномерной загрузке топлива в ротор, определится из соотношения:

$$M_{\text{дин}}^{\max} \cong \omega_{\text{ном}} \cdot r_p^2 \frac{m_t^{\max}}{t_r}. \quad (10)$$

Создание на валу электродвигателя дополнительного  $M_{\text{дин}}^{\text{загр}}$  обеспечивается за счет соответствующего увеличения потребляемой мощности:

$$\Delta N_{\text{дин}}^{\max} = \omega_{\text{ном}} \cdot M_{\text{дин}}^{\max} = \omega_{\text{ном}}^2 \cdot r_p^2 \frac{m_t^{\max}}{t_r}. \quad (11)$$

Максимальная мощность, необходимая для преодоления сил трения во вращающихся частях газогенератора при номинальном режиме работы электродвигателя привода с ротором, полностью загруженным топливом, определится из соотношения:

$$N_{\text{ст}}^{\max} = (m_t^{\max} + m_p) \cdot g \cdot f_{\text{тр}} \frac{d_b}{2} \cdot \omega_{\text{ном}}, \quad (12)$$

где  $m_p$  – масса всех вращающихся частей ротора без топлива;  $f_{\text{тр}}$ ,  $\frac{d_b}{2}$  – соответственно коэффициент трения и диаметр вала ротора в местах его опирания;  $g$  – ускорение свободного падения.

Максимальное значение номинальной мощности, потребляемой электродвигателем привода ротора при загрузке топлива в длительном режиме работы, определится как сумма:

$$N^{\max} = N_{\text{ст}}^{\max} + \Delta N_{\text{дин}}^{\text{загр}}. \quad (13)$$

После подстановки (11) и (12) в (13) окончательно получено:

$$N^{\max} \cong \omega_{\text{ном}}^2 \cdot r_p^2 \cdot \frac{m_t^{\max}}{t_r} \left[ \frac{\left(1 + \frac{m_p}{m_t^{\max}}\right) \cdot g \cdot f_{\text{тр}} \cdot \frac{d_b}{2}}{\omega_{\text{ном}} \cdot \frac{r_p^2}{t_r}} + 1 \right]. \quad (14)$$

Численная оценка значения первого слагаемого в квадратных скобках (14) показала, что им можно пренебречь по сравнению со вторым слагаемым, равным единице (при численной оценке принималось

$$\frac{m_p}{m_t^{\max}} = 7, \quad d_b = 0,03 \text{ м}, \quad f_{\text{тр}} = 0,01, \quad \omega_{\text{ном}} = 12 \frac{1}{\text{с}},$$

$$r_p \approx 0,3 \text{ м}, \quad t_r \leq 10 \text{ с}).$$

Таким образом

$$N^{\max} \cong \omega_{\text{ном}}^2 \cdot r_p^2 \cdot \frac{m_t^{\max}}{t_r}. \quad (15)$$

Теоретическая тепловая мощность, которую можно получить от сжигания генераторного газа, получаемого за время  $t_r$ , определится из соотношения:

$$N_{\text{г.г}} = Q_{\text{н}}^{\text{п}} \cdot V_{\text{г.г}} \cdot G_{\text{г.г}}, \quad (16)$$

где  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$  – низшая теплота сгорания генераторного газа, Дж/м<sup>3</sup>;  $V_{\text{г.г}}$  – выход генераторного газа из 1 кг топлива, м<sup>3</sup>/кг;  $G_{\text{г.г}}$  – расход топлива в газогенераторе, кг/с.

Поскольку без учета зольности  $G_{\text{г.г}} \approx \frac{m_t^{\max}}{t_r}$ , то

$$N_{\text{г.г}} \cong Q_{\text{н}}^{\text{п}} \cdot V_{\text{г.г}} \cdot \frac{m_t^{\max}}{t_r}. \quad (17)$$

Из уравнений (15) и (17) следует зависимость для предельного значения отношения максимальной мощности, потребляемой приводом газогенератора в длительном режиме работы, к тепловой мощности от сжигания получаемого генераторного газа:

$$\frac{N^{\max}}{N_{\text{г.г}}} \cong \frac{\omega_{\text{ном}}^2 \cdot r_p^2}{Q_{\text{н}}^{\text{п}} \cdot V_{\text{г.г}}}. \quad (18)$$

Для удержания частицы топлива массой  $m_i$  центробежной силой на периферии решетки горизонтального ротора газогенератора должно выполняться условие:

$$\frac{\omega_{\text{ном}}^2 \cdot m_i \cdot r_p}{m_i \cdot g} \geq K_{\text{гр}}.$$

Коэффициент  $K_{\text{гр}}$  в теории центробежного литья называется коэффициентом гравитации. Величина  $K_{\text{гр}}$  определяется опытным путем. При известном

значении  $K_{rp}$  угловая скорость и радиус ротора связаны соотношением:

$$\omega_{\text{ном}}^2 \cdot r_p = K_{rp} \cdot g. \quad (19)$$

После подстановки уравнения (19) в (18) окончательно получено:

$$\frac{N^{\text{max}}}{N_{\text{ГГ}}} \cong \frac{K_{rp} \cdot 9,81 \cdot r_p}{Q_{\text{н}}^p \cdot V_{\text{ГГ}}}. \quad (20)$$

В работах [4, 5] приводятся опытные значения  $Q_{\text{н}}^p$  и  $V_{\text{ГГ}}$  для различных типов газогенераторов:

$$Q_{\text{н}}^p = 4487 \div 6052 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3};$$

$$V_{\text{ГГ}} = 2,01 \div 2,53 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Таким образом, для  $r_p = \text{const}$  максимальное значение  $\frac{N^{\text{max}}}{N_{\text{ГГ}}}$  будет при  $(Q_{\text{н}}^p \cdot V_{\text{ГГ}})_{\text{min}}$ , а минимальное – при  $(Q_{\text{н}}^p \cdot V_{\text{ГГ}})_{\text{max}}$ . На рис. 4 представлена область предельных значений относительных затрат энергии на привод газогенератора роторного типа в зависимости от радиуса ротора ( $r_p$ ) при  $K_{rp} = 6$  и  $(Q_{\text{н}}^p \cdot V_{\text{ГГ}})_{\text{min}} \cong 9019$  кДж/кг и  $(Q_{\text{н}}^p \cdot V_{\text{ГГ}})_{\text{max}} \cong 15312$  кДж/кг.

Поскольку в действительности загрузка ротора топливом и его газификация идут одновременно и практически при одинаковых массовых расходах, то реальная величина затрат энергии на привод ротора в рабочем (длительном) режиме газогенерации при  $\omega_{\text{ном}} = \text{const}$  не превысит полученного предельного значения (20).

*Didenko V. N.*, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU  
*Kashin E. M.*, Graduate of post-graduate study, Kalashnikov ISTU

#### Method for determining the maximum energy costs for the drive of a rotor gas generator

*The article provides a determination of energy costs for the drive of the rotor gas generator operating in a steady (long-term) solid fuel gasification mode. The energy cost of the gas generator operation is defined and the energy obtained by burning the generator gas is determined.*

**Keywords:** rotor gas generator, energy cost, energy obtained by burning generator gas.

Получено: 21.09.15

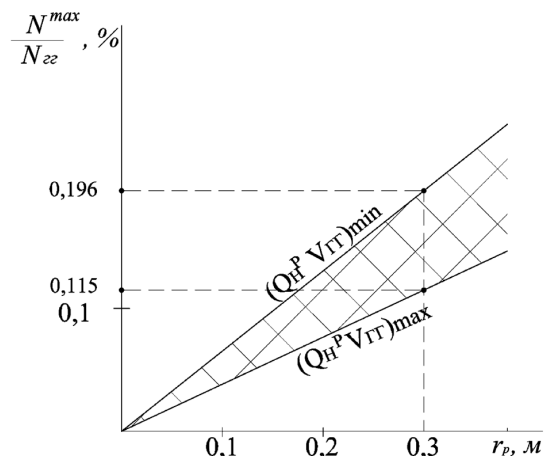


Рис. 4. Область предельных значений относительных затрат энергии на привод газогенератора в зависимости от радиуса инерции вращающейся массы топлива при  $K_{rp} = 6$

**Вывод:** затраты энергии на привод газогенератора роторного типа составляют ничтожно малую долю от энергии, получаемой при сжигании генераторного газа.

#### Библиографические ссылки

1. *Кашин Е. М., Диденко В. Н.* Активные зоны газогенератора твердого топлива роторного типа // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2. – 204 с.
2. *Кашин Е. М., Диденко В. Н.* Определение величины активной зоны газогенератора роторного типа // Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. – № 2. – 178 с.
3. Пат. 2497045 Российская Федерация, МПК F23G5/027, C10J3/00. Газогенератор твердого топлива / заявитель и патентообладатель: Кашин Е. М. – 2012110419/03; заявл. 19.03.2012; опубл. 27.10.2013.
4. *Кашин Е. М., Диденко В. Н.* Установки для получения генераторного газа. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2013. – 96 с.
5. *Кашин Е. М., Диденко В. Н.* История развития газогенераторов. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2013. – 76 с.

\*\*\*