

Моделирование эксплуатационных режимов локомотивного газотурбинного двигателя с регенератором

Е.Е. КОССОВ, д-р техн. наук, профессор
Д.Н. ЛЕСНИКОВ, инженер

Совершенствование автономной тяги во многом сдерживается тем, что дизельные силовые установки как источник энергии в своем развитии исчерпали возможности дальнейшего повышения технико-экономических характеристик, главные из которых — экологическая эффективность, экономичность, весогабаритные показатели, надежность и стоимость обслуживания, способность работать на различных видах топлива, в том числе на природном газе.

Альтернативой дизельным силовым установкам могут служить газотурбинные двигатели, которые в современном исполнении по всем перечисленным показателям имеют определенные преимущества. Выбросы вредных веществ на единицу выработанной энергии уменьшаются в 10–15 раз, КПД может достигать 50–55%, удельный вес ниже в 3–4 раза, долговечность выше в 2–2,5 раза, нет ограничений в использовании жидких и газовых топлив.

Для получения высоких показателей локомотивный двигатель должен работать по более сложному, чем у авиационных двигателей, циклу. При мощности 6–8 МВт нужно применить промежуточное охлаждение в процессе сжатия и нагрев воздуха перед подачей в камеру сгорания в теплообменнике-регенера-

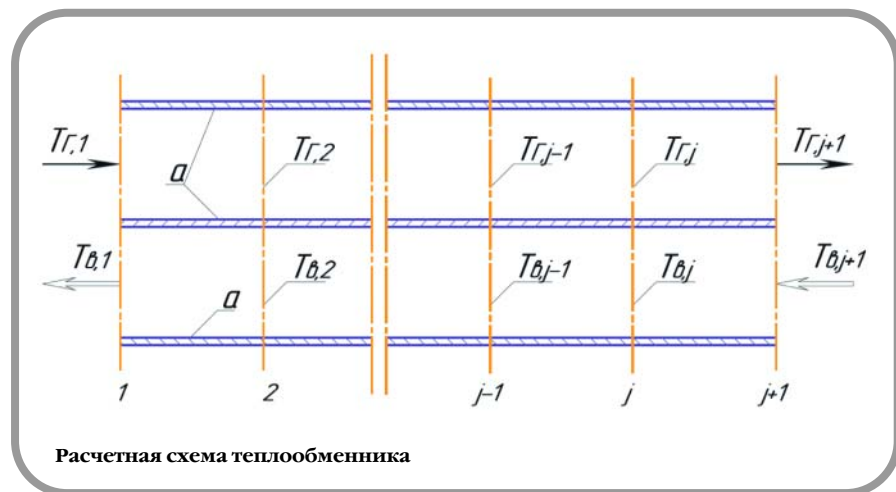
торе. Создание таких двигателей сегодня способна осуществить наша промышленность. Однако при применении эффективного регенератора-теплообменника возникает вопрос — способен ли двигатель со степенью регенерации 0,9–0,92 обеспечить характеристики, необходимые локомотиву при осуществлении поездной работы, по динамике тяговой мощности, числу термических циклов в теплообменнике-регенераторе, экономичности работы на частичных режимах. Для оценки этих факторов необходимо научиться имитировать режимы работы двигателя при эксплуатации на тяговом подвижном составе. Задачи определения показателей работы газотурбинных двигателей неоднократно ставились в теории [1], однако в аспекте имитации режимов работы на локомотиве эта задача поставлена впервые:

- необходимо достаточно четко математически описать нестационарные процессы в компрессоре, турбине, регенераторе во взаимодействии с тяговой передачей локомотива;

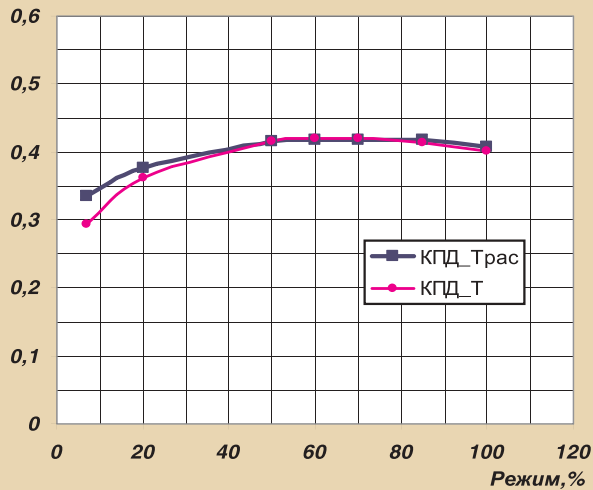
- описать рабочие процессы в тяговой передаче при выполнении поездной работы;

- задать способ имитации режимов работы тягового подвижного состава в зависимости от рода службы (грузовой, пассажирский, маневровый, местное и пригородное пассажирское сообщение).

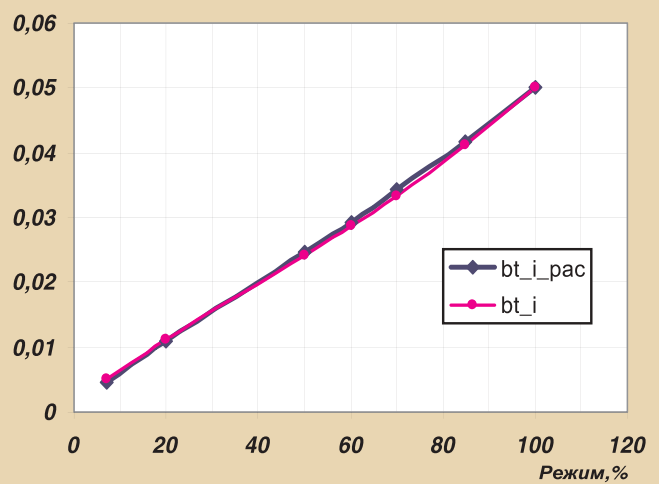
Наибольшую сложность при составлении такой модели представляет собой задача описания нестационарных процессов в компрессоре, турбине и регенераторе. В литературе присутствуют примеры описания нестационарных процессов в компрессорах и газовых турбинах, методы расчета регенератора в стационарных режимах [2], однако нет методов расчета регенератора-теплообменника в нестационарных режимах работы. В данной работе предложена упрощенная схема оценки — показателей работы регенератора-теплообменника в модели, описывающей нестационарные режимы работы газотурбинного двигателя. За основу модели расчета нестационарных процессов в компрессоре и турбине принята модель [3], разработанная для дизелей с высоким газотурбинным наддувом, в которой рассмотрена работа компрессора и турбины, а дизель представлен как совокупность гидравлической системы, определяющей расход воздуха, и камеры сгорания, в которой учитывается подвод тепла к рабочему телу. Использование этой модели позволяет рассчитать показатели газотурбинного двигателя, если добавить в систему регенератор-теплообменник. Расчетная схема теплообменника представлена на рисунке.



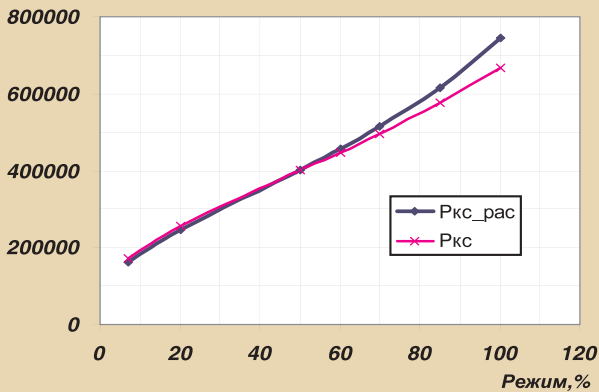
КГД_Т



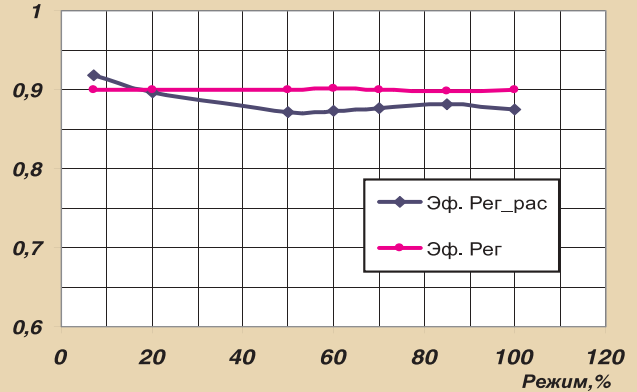
bt, кг/с



Р, Па



Эф. рег.



При расчете приняты следующие допущения:

- в соответствии с критерием Био пренебрегаем теплопроводностью в стенке регенератора;
- регенератор-теплообменник разбит на некоторое количество условных сечений, значение температуры стенки в которых на первом шаге берется из предыдущего расчета.

Уравнения теплообмена на каждом участке могут быть записаны в следующем виде:

- **теплоотвод от газов к стенке «а»:**

$$dQ_{гаij} = \alpha_{гij} \cdot F (T_{гij} - T_{aj}) dt_i, \quad (1)$$

где $dQ_{гаij}$ — теплота, отбираемая от газа за поверхностью «а», Дж;

$\alpha_{гij}$ — коэффициент теплоотдачи от газа к стенке на поверхности «а», Дж/(м²·К);

F — площадь омывания, м²;

$T_{гij}$ — температура воздуха на каждом сечении регенератора, К;

T_{aj} — средняя температура поверхности «а», К;

- **теплоотвод на нагрев стенки «а»:**

$$dQ_{аij} = C_a \cdot m_a (T_{аij} - T_{a(i-1)j}), \quad (2)$$

где $dQ_{аij}$ — теплота, затраченная на нагрев стенки «а», Дж;

C_a — теплоемкость стенки регенератора «а», Дж/(кг·К);

m_a — масса регенератора, кг;

$T_{a(i-1)j}$ — средняя температура поверхности «а» на предыдущем шаге интегрирования, К;

- **теплоотвод от стенки «а» к воздуху:**

$$dQ_{BAij} = \alpha_{Bij} \cdot F (T_{aj} - T_{Bij}) dt_i, \quad (3)$$

где dQ_{BAij} — теплота, отведенная от поверхности «а» к воздуху, Дж;

α_{Bij} — коэффициент теплоотдачи от газа к стенке на поверхности «а», Дж/(м²·К);

- **количество тепла в обработанных газах:**

$$dQ_{Гij} = Cp_{Гij} \cdot G_{Г} \cdot (T_{Гij} - T_{Г(i+1)j}) dt_i, \quad (4)$$

где $G_{Г}$ — расход газа, кг/с;

$Cp_{Гij}$ — теплоемкость газа, Дж/(кг·К);

- **количество тепла в воздухе:**

$$dQ_{Bij} = Cp_{Bij} \cdot G_B \cdot (T_{Bi(j+1)} - T_{Bij}) dt_i, \quad (5)$$

где G_B — расход воздуха, кг/с;

Cp_{Bij} — теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К).

При нестационарном теплообмене баланс теплоты описывается системой уравнений

$$\begin{cases} dQ_B = dQ_{Ba}; \\ dQ_{Г} = dQ_{Ga}; \\ dQ_{GA} = dQ_A + dQ_{BA}. \end{cases} \quad (6)$$

В результате решения системы уравнений для каждого условного участка получаем:

- **уравнение температуры воздуха:**

$$T_{B(ij)} = \frac{T_{B(i,j+1)} \cdot Cp_{Bi} \cdot G_B + 0.5 \cdot \alpha_{Bi} \cdot f \cdot (2 \cdot T_{Aij} - T_{B(i,j+1)})}{Cp_{Bi} \cdot G_B + 0.5 \cdot \alpha_{Bi} \cdot f}, \quad (7)$$

- **уравнение температуры газа:**

$$T_{Г(i,j+1)} = \frac{T_{Гij} \cdot Cp_{Гi} \cdot G_{Г} + 0.5 \cdot \alpha_{Гi} \cdot f \cdot (2 \cdot T_{Aij} - T_{Гij})}{Cp_{Гi} \cdot G_{Г} + 0.5 \cdot \alpha_{Гi} \cdot f}, \quad (8)$$

● уравнение температуры стенок «а»:

$$\Delta T_{A(i,j+1)} = \frac{0,5 \cdot \alpha_{Tij} f (T_{Tij} - T_{T(j+1)}) + 0,5 \cdot \alpha_{Bij} f (T_{Bij} - T_{B(i,j+1)}) + c_A \cdot m_A T_{A(i+1)j} \cdot dt^{-1}}{\alpha_{Tij} f + \alpha_{Bij} f + c_A \cdot m_A} \cdot dt^{-1} \quad (9)$$

Алгоритм расчета предусматривает многократное (20 раз) последовательное определение температуры газа, воздуха и стенок в сечениях регенератора-

теплообменника, принимая температуру стенок в каждом проходе равной ее величине и предыдущем шаге.

Разработанная методика включена в программу расчета показателей работы газотурбинного двигателя на нестационарных режимах

и позволяет определить влияние поверхности и массы теплообменника на временные характеристики переходного процесса.

В результате можно говорить о разработке методики расчета нестационарных процессов в газотурбинном двигателе с регенератором-теплообменником. Применение разработанной математической модели позволяет выбрать характеристики теплообменника для локомотивного газотурбинного двигателя в зависимости от режима работы локомотива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котляр И.В. Переходные процессы в газотурбинных установках. – Л.: Машиностроение, 1973.
2. Софронов А.Ф., Тихонов А.М. Исследование характеристик пластинчатых поверхностей нагрева // Теплотехника. – 1970. – № 9.
3. Коссов Е.Е., Сухопаров С.И. Оптимизация режимов работы тепловозных дизель-генераторов. – М.: Интекст, 1999.

