

**«РЕГУЛИРОВАНИЕ ГАЗОПАРОТУРБИННОЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ
ТЕПЛА В ГАЗОЖИДКОСТНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ»**

Бакулев В. И. , Крылов Б. А., Юн А. А

1. Введение

В настоящее время в мире наблюдается тенденция увеличения использования газотурбинных двигателей в качестве энергетических стационарных установок для получения электричества, тепла и т.д. Основой для разработки и создания энергетических и двигательных установок может являться конверсия высокоэффективных современных авиационных газотурбинных двигателей. Одним из вариантов создания такой установки является газопаротурбинная энергетическая установка (ГЭУ) с двукратным подводом тепла при постоянных давлениях в основной камере сгорания перед турбиной компрессора и в дополнительной камере сгорания перед свободной турбиной. (1) Использование ГЭУ предполагает «многорежимность» двигателя (например: зимой - максимальный, летом – минимальный режим) и следовательно требуется исследовать возможные способы регулирования такого двигателя.

2. Обозначения и сокращения

$N_{y\partial}$ - удельная мощность, кВтс/кг;

η_e - эффективный КПД;

m - удельный расход воды

$\pi_{эж}$ – степень повышения давления в эжекторе

T - температура, К;

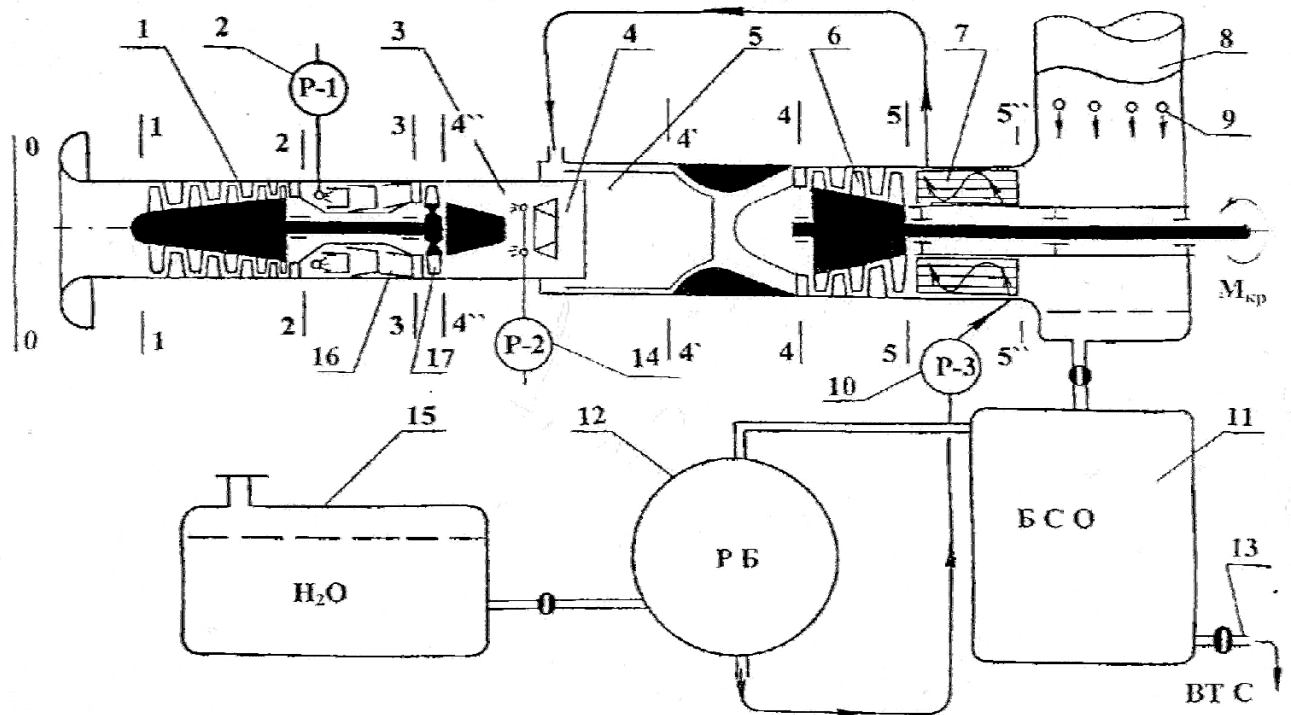
P – давление, Па;

ГТД - газотурбинный двигатель;

ГЭУ – газопаротурбинная энергетическая установка.

3. Принципиальная схема газопаротурбинной энергетической установки

Схема ГЭУ с двукратным подводом тепла при постоянных давлениях в основной камере сгорания перед турбиной компрессора и в дополнительной камере сгорания перед свободной турбиной, совмещенной с парогазовым эжектором, и регенерацией тепла в газожидкостном теплообменнике представлена на рис.1.



Эта установка работает на основе бинарного (смешанного) термодинамического цикла, который более подробно рассмотрен в [1]. Разработаны алгоритм и программа термогазодинамического расчета на базе математической модели первого уровня, отражающей реальные условия совместной работы отдельных элементов в системе ГЭУ с дискретным изменением теплоемкости рабочих тел и формальным заданием коэффициентов, характеризующих потери в элементах ГЭУ. Также был проведен сравнительный параметрический анализ двигателя [1], который показал, что ГЭУ с бинарным газопаровым термодинамическим циклом позволяет получить эффективную работу (удельную мощность N_{y0}) $l_e \geq 980$ кДж/кг, превышающую эффективную работу (удельную мощность) авиационных ГТД примерно в четыре раза, при эффективном КПД $\eta_e \geq 0,34$, находящемся на уровне КПД лучших современных ГТД.

4. Дроссельная характеристика ГЭУ.

Алгоритм расчета и программы дросселирования ГЭУ.

Введение в обычный ГТД дополнительной камеры и использование регенерации тепла схемы теплообменник – эжектор позволяет гибко регулировать двигатель. Регулирование такого двигателя целесообразно проводить в 2 этапа: регулирование за

счет системы дополнительная камера + эжектор + теплообменник и непосредственное регулирование двигателя ТВ-3-117 [2,3]. Рассмотрим 1 этап.

1. Программа регулирования $T_4^* = const, m = var$.
2. Программа регулирования $m = const, T_4^* = var$.
3. Программа регулирования $T_4^* = var, m = var$.

Программа регулирования $T_4^* = const, m = var$.

При данном законе регулирование двигателя состоит из 2-х частей.

1-я часть: С уменьшением подвода тепла в дополнительную камеру соответственно будет уменьшаться расход воды m и степень повышения давления в эжекторе $\pi_{эж}$. При этом также будет увеличиваться температура за теплообменником $T_5^{*''}$ вследствие уменьшения степени регенерации $\sigma_{рег}$. В первом приближении будем использовать линейные зависимости $\pi_{эж} = f(m)$ (рис. 2). Так как подвод тепла в дополнительной камере сгорания уменьшается, уменьшаются и потери связанные с подводом тепла σ_{mn} , гидравлические потери σ_2 остаются постоянными. ($\sigma_{дкс} = \sigma_{mn} \sigma_2$) Зависимость $\sigma_{дкс} = f(q_{дкс})$ представлена на рис. 3. При уменьшении расхода воды до минимального уровня $m_{min} = 0.10$ расчет первой части заканчивается.

2-я часть: Полностью прекращается подача воды, происходит дальнейшее уменьшение подачи тепла в дополнительную камеру сгорания, ограничение на температуру перед свободной турбиной $T_4^* = 1200 K$ снимается. При достижении минимальной температуры за дополнительной камерой сгорания $T_{4min}^{*'} = 1050 K$ расчет заканчивается.

Примечание: достижение температуры $T_4^{*'} = 996 K$ практически невозможно вследствие срывной характеристики дополнительной камеры сгорания («бедный» срыв), также невозможно добиться около нулевого расхода воды из-за ограниченности работы насоса.

Программа регулирования $m = const, T_4^* = var$.

При уменьшении подвода тепла в дополнительную камеру будем держать постоянным расход воды m и степень повышения давления в эжекторе $\pi_{эж}$. При этом также будет возрастать степень $\sigma_{рег}$.

Недостатком данного способа является ухудшение работы теплообменного аппарата (уменьшение теплоперепада) и эжектора (переход к воде), достоинством же является повышение КПД двигателя вследствие повышения регенерации тепла.

Зависимость степени повышения давления газа в эжекторе $\pi_{\text{эж}}$ от относительного расхода воды m

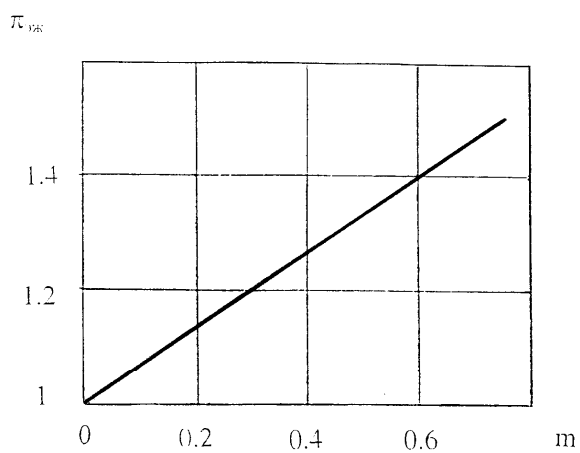


Рис. 2

Зависимость коэффициента восстановления давления $\sigma_{\text{дкс}}$ от относительного расхода топлива $q_{\text{дкс}}$

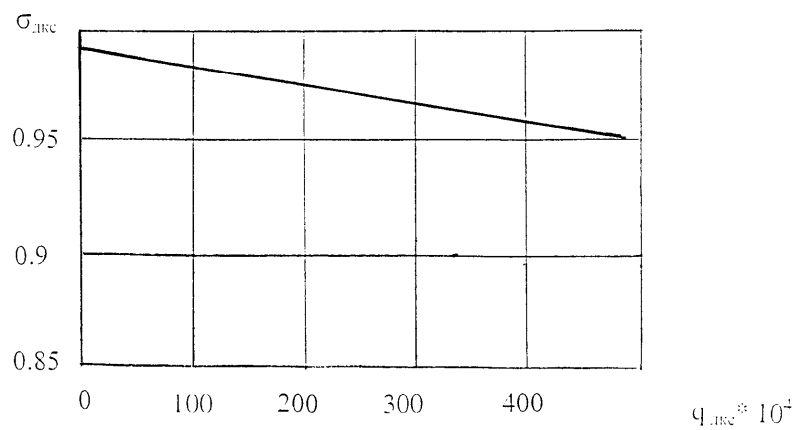


Рис. 3

Программа регулирования $m = var, T_4^* = var$.

Данная программа регулирования является более предпочтительной, чем две предыдущие программы, так как позволяет получить более высокий КПД двигателя без образования воды в эжекторе.

Отличие от первой программы регулирования состоит в том, что регенерация тепла продолжается вплоть до выключения дополнительной камеры сгорания. Уменьшая подвод тепла в дополнительную камеру, соответственно будет уменьшаться расход воды m и степень повышения давления в эжекторе $\pi_{эж}$. При этом также будет увеличиваться температура за теплообменником $T_5^{*''}$ вследствие уменьшения степени регенерации $\sigma_{рег}$, будет также уменьшаться температура перед свободной турбиной T_4^* . В первом приближении будем использовать линейные зависимости $\pi_{эж} = f(m)$, $T_4^* = f(m)$ (рис.2 и рис. 4). Так как подвод тепла в дополнительной камере сгорания уменьшается, уменьшаются и потери связанные с подводом тепла $\sigma_{мп}$, гидравлические потери σ_2 остаются постоянными. ($\sigma_{дкс} = \sigma_{мп} \sigma_2$) Зависимость $\sigma_{дкс}$ представлена на рис. 3.

При достижении минимальной температуры за дополнительной камерой сгорания $T_{4min}^{*'} = 1050 K$ расчет заканчивается.

Зависимость температуры перед свободной турбиной T_4^* от относительного расхода воды m

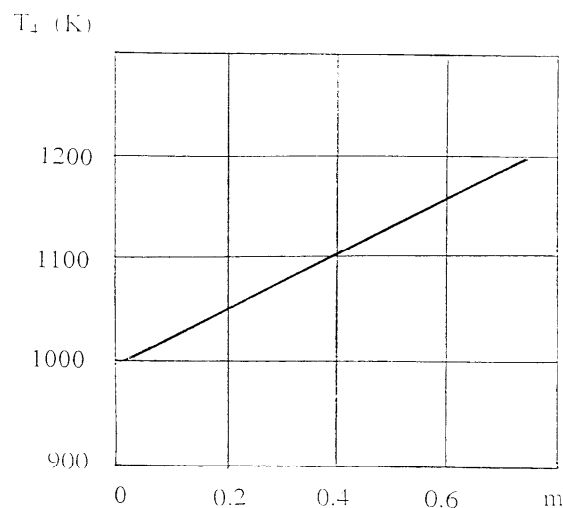


Рис. 4

Выводы

При расчете эффективного КПД ГЭУ - η_e в первом приближении принят постоянный КПД свободной турбины $\eta_{ст}$, а зависимость степени повышения давления в эжекторе от расхода воды $\pi_{эж} = f(m)$ взята линейной. К ограничениям, накладываемым на параметры рабочего процесса, добавляются следующие ограничения :

Расход воды :

$$m \geq 0.10 .$$

Температура газа в дополнительной камере сгорания:

$$T_4^{*'} \geq 1050 \text{ K}.$$

Зависимость эффективного КПД ГЭУ - η_e от удельной мощности - $N_{уд}$ представлена на рис. 5. Первая кривая при программе регулирования $T_4^* = const, m = var$, вторая кривая при программе регулирования $T_4^* = var, m = var$. Пунктирной линией показаны нерабочие режимы. Точка Р – расчетная точка, Д – ГЭУ с выключенной дополнительной камерой и нулевым расходом воды

При первой программе регулирования эффективный КПД η_e уменьшается до точки прекращения подачи воды, потом резко увеличивается. Зона уменьшения КПД объясняется уменьшением расхода воды и следовательно степени регенерации, что приводит к снижению КПД. Резкое увеличение КПД происходит вследствие повышения экономичности цикла за счет выключения дополнительной камеры сгорания.

При третьей программе регулирования наблюдается плавный рост эффективного КПД η_e . Рост КПД объясняется уменьшением подвода тепла в дополнительную камеру сгорания, а также уменьшением температуры перед свободной турбиной $T_4^{*'}$, что позволяет более плавно уменьшать расход воды, чем при первой программе регулирования. Изменение расхода воды m в зависимости от удельной мощности показан на рис. 6.

Как видно из рис.5, более предпочтительной является третья программа регулирования, также можно отметить, что преимуществом данного двигателя является широкий диапазон работы (200-900 кВт) при относительно постоянном КПД.

*

Зависимость эффективного КПД η_e от удельной
 мощности $N_{уд}$ при различных
 законах регулирования

1. $T_4^* = const, m = var$
2. $T_4^* = var, m = var$

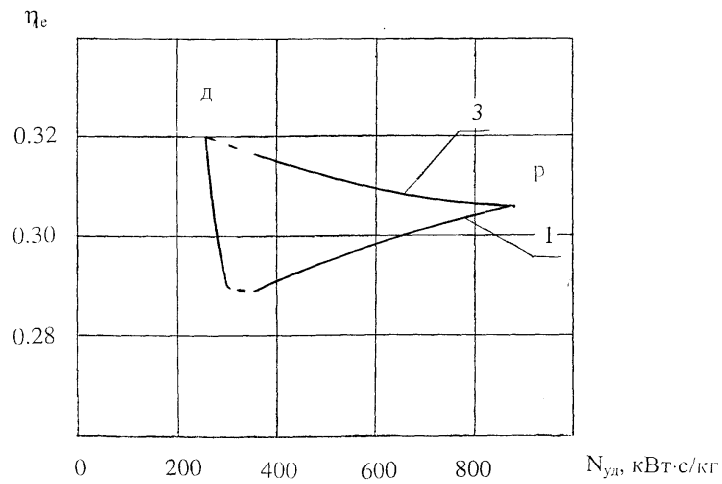


Рис. 5

Зависимость расхода воды m от удельной
 мощности $N_{уд}$ при различных
 законах регулирования

1. $T_4^* = const, m = var$
2. $T_4^* = var, m = var$

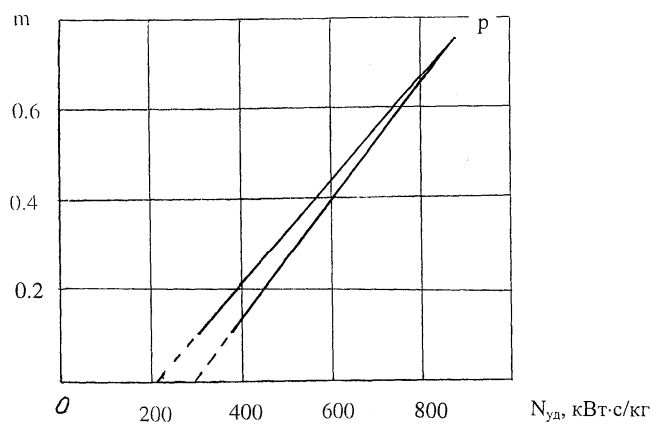


Рис. 6

Список используемой литературы

1. Использование газопаротурбинной установки с регенерацией тепла в газожидкостном теплообменнике в народном хозяйстве./ В. И. Бакулев, А. А. Юн – М.: МАИ, 2000
2. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей. / В. М. Акимов, В. И. Бакулев, Р. И. Курзинер и др. – М.:Машиностроение, 1987
3. Расчет высотно-скоростных и дроссельных характеристик ТРД и ТРДФ. / В. И. Бакулев, Б. А. Крылов, А. А. Юн – М.: МАИ, 2000