

УДК 621.437

В.Н. Литошенко, канд. техн. наук, доцент*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: emss@stel.sebastopol.ua***К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ
СЕГМЕНТНО-КОЛЬЦЕВЫХ ВСТРОЕННЫХ КАМЕР СГОРАНИЯ
ПРОМЕЖУТОЧНОГО ПОДОГРЕВА ГАЗА ГТУ**

*Предлагается эмпирическая зависимость теплонапряженности торцов стабилизаторов
пламени встроенной в корпус турбины сегментно-кольцевой камеры сгорания промежуточного
подогрева газа ГТУ на газообразном топливе, обеспечивающая минимальную длину камеры.*

Карнотизация циклов ГТУ за счет приближения процессов сжатия воздуха и расширения газа к изотермическим, как показали теоретические исследования научной школы профессора В.В. Уварова в МВТУ им. М.Э. Баумана, увеличивает эффективность ГТУ, но при значительных степенях повышения давления. Приближения процесса расширения газа к изотермическому за счет подогрева газа за каждым лопаточным венцом до настоящего времени не осуществлено. Как показали исследования автора [3], стабилизация пламени за тонкими (менее 2...3 мм) выходными кромками сопловых и рабочих лопаток газовых турбин при скоростях потока 100...200 м/с осуществить невозможно. Поэтому на практике в ГТУ сложных циклов промежуточный подогрев газа осуществляют в камере сгорания промежуточного подогрева газа (КСППГ).

Все построенные ГТУ с промежуточным подогревом газа (ГТ-100-750, ГТ-50 и т.д.) выполнялись индивидуальными выносными, аналогичными по конструкции основным камерам сгорания, и гораздо больших размеров, так уровни скоростей потока оставался неизменным и давление потока было значительно меньшим. Это значительно увеличивало массо-габаритные характеристики ГТУ сложных циклов и делало их непригодными для большинства отраслей промышленности и транспорта, кроме энергетики.

Признание альтернативными децентрализации энерго- и теплоснабжения населенных пунктов и развитие глубокой утилизации теплоты промышленных и транспортных энергетических установок потребовало в настоящее время возобновления разработок когенерационных ГТУ сложных циклов [1].

Однако, постоянно растущие цены на органическое топливо сужают диапазоны использования ГТУ за счет более экономичных тепловых двигателей и делают решающим аргументом при их использовании минимальные массогабаритные характеристики. Поэтому подавляющее большинство выпускаемых в настоящее время ГТД – простого цикла, однокорпусные, сигаровидного вида. Совместить вышеприведенные тенденции можно за счет создания ГТУ сложных циклов со встроенными в сигарообразный корпус регенераторами, воздухоохладителями и камерами сгорания промежуточного подогрева газа (КСППГ).

Целью статьи является оптимизация теплонапряженности сегментно-кольцевой микрофакельной встроенной в корпус турбины газовой КСППГ на газообразном топливе по результатам экспериментальных исследований, проведенных автором на Калужском турбинном заводе, в Киевском политехническом институте и литературным данным [2 – 5].

Разместить такие КСППГ возможно в переходном патрубке между ТВД и ТСД, ТСД и ТНД, ТНД и турбиной перерасширения газа, но так как кольцевое пространство этих патрубков разделено 3 или 4 радиальными стойками от подшипников роторов турбин к корпусу турбины, то конструкция КСППГ получается сегментно-кольцевой. Были разработаны горелочные устройства со стабилизаторами пламени радиального типа, соединенными пламяперекидными переключками, конструкции которых защищены авторскими свидетельствами. 85...90 % потока проходило между стабилизаторами, а 10...15 % – через 3 щели охлаждения пламенной трубы. За счет микрофакельного сжигания газообразного топлива за системами радиальных стабилизаторов и организации параллельного (без смесителя) протекания процессов стабилизации, горения и смешения значительно сокращается длина КСППГ. Поперечные размеры камеры вписываются с незначительным расширением проточной части патрубка, а длина не должна превышать 300...600 мм.

Если учесть, что скорость потока в переходном патрубке составляет 50...70 м/с, то затенение поперечного сечения горелки можно вычислить как

$$f = \frac{\Sigma F_{cm}}{\Sigma F_{cm} + \Sigma F_{зaz}} \leq 0,3...0,6,$$

где F_{cm} и $F_{зaz}$ – соответственно, площади поперечного сечения торца стабилизатора и зазоров между ними.

При этом скорость потока возрастает до 100... 150 м/с, что, в свою очередь, определяет ширину стабилизатора $B = 25...30$ мм, достаточную для устойчивой работы КСППГ на всех возможных режимах работы ГТУ [3, 4].

Наименьшая длина факела пламени обеспечивается, когда процесс горения заканчивается в непосредственной близости от зоны обратных токов за стабилизатором, т.е.

$$l_{\phi} \approx k \cdot l_{\text{зот}}^{\max},$$

где $k = 1,5$ учитывает неизотермические условия течения и зону догорания топлива.

Наибольшая длина зоны обратных токов $l_{\text{зот}}^{\max}$ наблюдается в районе пламяперекидных перемычек между стабилизаторами [2]

$$l_{\text{зот}}^{\max} = 9,2B - 0,09 \frac{B^2}{f},$$

где B – ширина стабилизатора пламени, мм.

По результатам испытаний в заданном диапазоне параметров ($T_1=773...973$ К, $P_1= 0...0,6$ МПа, $W_1= 50...300$ м/с, $\alpha = 6...31$ и $f= 0,37...0,6$) длина КСППГ составила

$$l_{\text{ксппг}} = (8...10)B + 100, \text{ мм, при } \alpha \geq 10 \text{ и } \Delta T \leq 150 \text{ К;}$$

$$l_{\text{ксппг}} = (12...15)B + 100, \text{ мм, при } \alpha < 10 \text{ и } \Delta T > 150 \text{ К.}$$

Здесь α – коэффициент избытка воздуха; ΔT – подогрев пара в КСППС, К.

Характеристикой интенсивности процессов горения и смешения в камере сгорания служат теплонапряженности ее объема

$$U_v = \frac{G_t \cdot Q_n^p \cdot \eta_{\text{кк}}}{V}, \text{ Вт/м}^3 \cdot \text{Па} \text{ и поперечного сечения } U_f = \frac{G_t \cdot Q_n^p \cdot \eta_{\text{кк}}}{F_{\text{кк}}}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{Па},$$

где G_t – расход топлива, кг/с; Q_n^p – низшая теплотворная способность топлива, кДж/кг; $\eta_{\text{кк}}$ – коэффициент полезного действия КСППГ; V – объем КСППГ, м³; $F_{\text{кк}}$ – площадь сечения КСППГ, м².

В традиционных камерах сгорания отношение длины камеры сгорания $l_{\text{кк}}$ поперечному размеру составляет 2...3, поэтому можно принять $U_f = U_v \cdot l_{\text{кк}}$.

Так как в микрофакельной камере сгорания процесс горения развивается за торцом стабилизаторов пламени, то теплонапряженность торцов стабилизаторов U_F можно считать определяющей характеристикой $U_F = U_f / f$.

Расход топлива, сожженного за стабилизатором, можно выразить теплонапряженностью его торца

$$G_t = \frac{\sum F_{\text{ст}} \cdot U_f}{Q_n^p \cdot \eta_{\text{кк}}}.$$

Выражая количество теплоты, подведенной к газу в КСППГ через его подогрев $\Delta T \cdot c_{\text{гр}}$, которое равно теплоте, отданной сгоревшим топливом $G_t \cdot Q_n^p \cdot \eta_{\text{кк}}$, можно выразить подогрев газа в КСППГ через теплонапряженность торца стабилизатора

$$\Delta T = \frac{U_F \cdot f}{(1-f)W_1 \cdot \gamma_1 \cdot c_{\text{гр}}} = \frac{U_F}{(1/f - 1)W_1 \cdot \gamma_1 \cdot c_{\text{гр}}}.$$

Из формулы следует, что подогрев газа в КСППГ ΔT прямопропорционален теплонапряженности торца стабилизатора U_F и обратнопропорционален скорости потока на срезе стабилизатора W_1 , удельному весу γ_1 и теплоемкости газа $c_{\text{гр}}$.

Применение сегментно-кольцевых, встроенных в корпус турбин, прямоточных микрофакельных КСППГ значительно сокращает осевые размеры ГТУ сложных циклов и открывает большие возможности в увеличении количества ступеней подогрева. Так как подогрев газа в отдельных ступенях невелик, возникает вопрос о допустимой оптимальной теплонапряженности КСППГ, обеспечивающей ее минимальную длину. Для подобных камер с диффузионным сжиганием газообразного топлива за системами радиальных стабилизаторов пламени можно обеспечить оптимальную теплонапряженность торца стабилизатора при минимальной длине камеры, сгорания, как это было отмечено выше, когда процесс сгорания топлива заканчивается в непосредственной близости от зоны обратных токов.

Приравняв длину факела пламени к максимальной длине зоны обратных токов (в районе пламяперекидных перемычек), выражая U_F через общий коэффициент избытка воздуха и используя эмпирическую формулу для определения длины факела в зависимости от режимных и конструкторских параметров в КСППГ, получим следующее выражение

$$U_F^{opt} = \frac{0.02571 \cdot W_1 \cdot \gamma_1 \cdot Q_p'' \eta_{kc} (1 - f)}{L_{o1} \cdot P_1 \cdot f \left\{ 0.6298 \cdot \log[1.5(9.2 + 0.09B/f) \cdot (1.9W_1^{2.9} \cdot 10^{-7} + 0.887) \cdot (883/T_1)^2 + 2.12 \exp(W^{0.6}/10 - T_1/500)] \right\}},$$

где W_1 , м/сек, γ_1 , кг/м³, P_1 , МПа, T_1 , К – скорость, удельный вес, давление и температура на срезе стабилизаторов; L_{o1} , кг/кг – теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива с учетом баллаستировки потока продуктами сгорания.

Таким образом, чем больше площадь торцов стабилизаторов $\Sigma F_{ст}$, тем больше можно за ними сжечь топлива, но при этом увеличатся f , W_1 , факел станет уже и длиннее, возрастут потери давления в КСППГ. При потребности увеличения подогрева газа $\Delta T > 150$ К и $\alpha < 10$, следует провести испытания КСППГ с микрофакельными горелками НЗЛ [5].

Вышеприведенные зависимости можно использовать для проектирования встроенных сегментно-кольцевых микрофакельных КСППГ на газообразном топливе, что и составит предмет дальнейших исследований в данном направлении.

Библиографический список

1. Матвеев В.Т. Теплотехнические характеристики ГТД с промежуточным подогревом газа и силовой турбины перерасширения / В.Т. Матвеев, В.Н. Литошенко // *Авиационно-космическая техника и технология*. — 2004. — Вып. 8/16. — С. 9 – 12.
2. Христин В.А. Исследование размеров зоны обратных токов за системой уголкового стабилизатора пламени / В.А. Христин, В.Н. Литошенко // *Вестник Киевского политехнического института. Сер. Теплоэнергетика*. — 1968. — № 5. — С. 10 – 15.
3. Христин В.А. Об особенностях зажигания и стабилизации пламени при диффузионном сжигании топливного газа за уголковыми стабилизаторами / В.А. Христин, В.Н. Литошенко // *Теплоэнергетика*. — 1969. — № 7. — С. 52 – 57.
4. Христин В.А. О корреляции характеристик срыва и зажигания пламени при диффузионном сжигании топлива за системами уголкового стабилизатора / В.А. Христин, В.Н. Литошенко // *Известия вузов. Сер. Машиностроение*. — 1970. — № 5. — С. 78 – 82.
5. Сударев А.В. Камеры сгорания ГТУ. Интенсификация горений / А.В. Сударев, В.А. Маев. — Л.: Недра, 1990. — 274 с.

Поступила в редакцию 13.11.2007 г.