

УДК 621.438(076.5)

**В. П. ГЕРАСИМЕНКО**, д-р техн. наук; проф. НАКУ «ХАИ»; Харьков;  
**М. М. ОВЧИННИКОВ**, магистр НАКУ «ХАИ», Харьков;  
**М. Ю. ШЕЛКОВСКИЙ**, инженер ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев

## ОПТИМИЗАЦИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Предложены мероприятия повышения топливной экономичности малоразмерных газотурбинных двигателей и энергетических установок с регенерацией тепла путем термодинамической оптимизации рабочего процесса и газодинамической оптимизацией узлов двигателя. Оптимальная степень повышения давления ГТД с температурой газа  $T_T^* = 1100 \dots 1200$  К и степенью регенерации  $\beta_p = 0,8 \dots 0,9$  составляет  $\pi_{к\eta_e} = 3,5 \dots 4,5$ , а КПД –  $\eta_e = 0,33 \dots 0,35$ . Также выполнена оптимизация центробежного компрессора и турбины.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, компрессор, турбина, регенерация тепла, оптимизация, коэффициент полезного действия.

### Введение

К малоразмерным газотурбинным двигателям (ГТД) относят авиационные и судовые бортовые вспомогательные силовые установки (ВСУ) мощностью от 10...20 до 500...700 кВт или таких же мощностей двигатели для беспилотных летательных аппаратов [1], легких вертолетов и небольших самолетов [2]. Зарубежный опыт эксплуатации подобных ГТД показал, что они могут быть лучшими двигателями для турбопоездов, гусеничных машин и большегрузных автомобилей [3], или приводами передвижных электростанций (ПЭС) и газоперекачивающих агрегатов (ГПА) [4]. В виду меньшей токсичности выхлопных газов особый интерес такие ГТД представляют для маломощных мобильных энергетических установок, производящих электрическую и тепловую энергию на промышленных предприятиях и современных жилых комплексах. Главной проблемой ГТД в сравнении с поршневыми двигателями остается недостаточная топливная экономичность.

**Целью** данной статьи является совершенствование малоразмерных ГТД для повышения их экономичности. К особенностям таких ГТД в сравнении с полноразмерными относятся: масштабный фактор, отрицательно влияющий на рабочие процессы посредством критерия Рейнольдса; влияние радиальных зазоров в турбомашинах; снижение точности изготовления деталей и элементов проточной части двигателя; трудности в охлаждении турбин при высоких температурах газа  $T_T^*$ .

**Результаты исследования.** Действенным средством повышения экономичности энергетических и транспортных ГТД, а также ГПА является применение регенерации тепла. Эффективный КПД ГТД с регенерацией тепла определяют по формуле [1, 4]

$$\eta_{ep} = \frac{\left( \frac{\theta \eta_k \eta_T}{e} - 1 \right) \left( \frac{e-1}{\eta_k} \right)}{\theta \left\{ E - \beta_p \left[ E - \epsilon \left( 1 - \frac{1}{e} \right) \eta_T \right] \right\} - (1 - \beta_p) \left[ 1 + (e-1) \frac{1}{\eta_k} \right]}, \quad (1)$$

где  $\beta_p$  – степень регенерации;  $\theta = T_T^*/T_H$  – степень подогрева в цикле;  $E = C_{pg}/C_p$  –

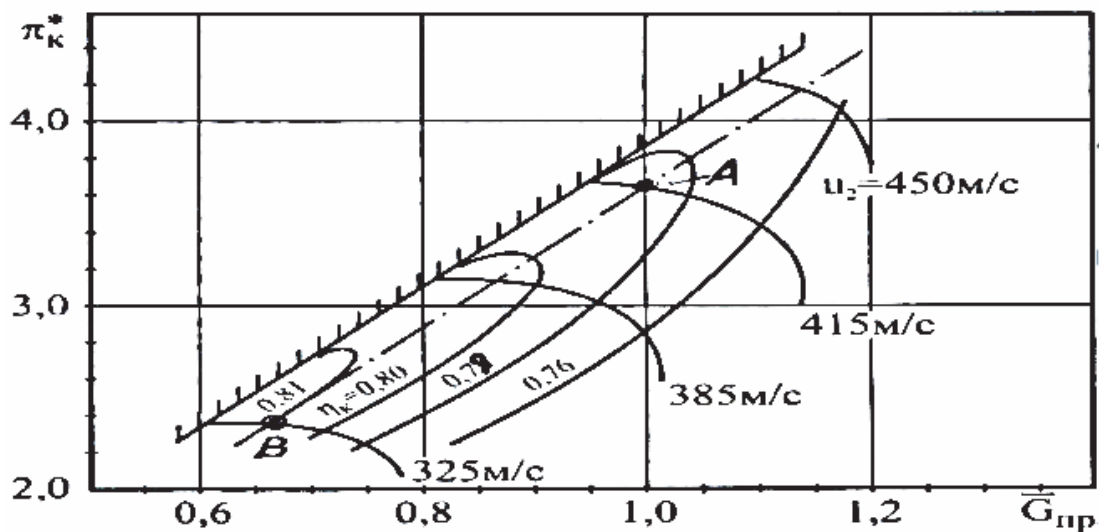
отношение теплоемкостей газа и воздуха;  $\epsilon = [C_{pг}(e_T - 1)e] / [C_p(e - 1)e_T]$ ;  $e = \pi_k^{*(k-1)/k}$ ;  $e_T = \pi_T^{*(k-1)/k}$ ;  $\pi_k^*$  и  $\pi_T^*$ ,  $\eta_k$  и  $\eta_T$  – степени повышения давления в компрессоре и понижения давления в турбине и их КПД с учетом потерь давления в регенераторе, во входном и выходном устройствах и камере сгорания.

Исследование данной формулы (1) на экстремум позволяет определить оптимальную по КПД двигателя степень повышения давления в компрессоре при наличии регенерации тепла  $\pi_{к\eta e}$ , как функцию от вышеперечисленных переменных [1]. Параметрические исследования такой функции в зависимости от этих переменных показывают, что при температуре газа перед неохлаждаемой турбиной  $T_T^* = 1100 \dots 1200$  К оптимальная степень повышения давления в компрессоре ГТД со степенью регенерации  $\beta_p = 0,8 \dots 0,9$  составляет  $\pi_{к\eta e} = 3,5 \dots 4,5$ . Эффективный КПД ГТД с учетом гидравлических потерь в регенераторе при этом достигает значений  $\eta_e = 0,33 \dots 0,35$ , что на (30...40) % выше КПД ГТД без регенерации тепла, требующего существенно более высокой степени повышения давления в компрессоре ( $\pi_{к\eta e} = 12 \dots 15$ ). Потребность меньшей степени повышения давления в компрессоре ГТД с регенерацией тепла упрощает конструкцию двигателя, снижает затраты на его изготовление, обслуживание в эксплуатации и ремонт. В частности компрессором малоразмерного ГТД может быть использован центробежный компрессор (ЦБК) с многоярусным рабочим колесом (РК) и числами лопаток в ярусах [4] 10:20:40 или 11:22:44 при оптимальных их размерах. Согласно оптимизации условий входа в такие колеса при заданной производительности  $G$  и осевом подводе воздуха получено соотношение [5]

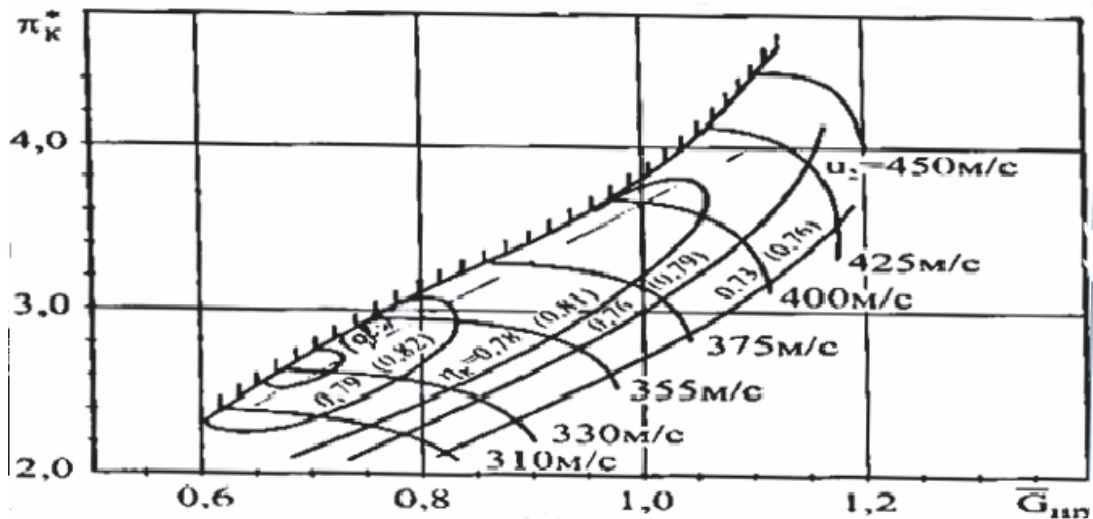
$$\frac{G\omega^2}{\pi(1-\bar{d}_1^2)P_1^* \sqrt{k^3 RT_1^*}} = \frac{M_{w1H}^3 \sin \beta_{1H} \cos^2 \beta_{1H}}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_{w1H}^2 \sin^2 \beta_{1H}\right)^{\frac{1}{k-1} + \frac{3}{2}}}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения РК;  $\bar{d}_1$  – относительный диаметр втулки РК;  $P_1^*$ ,  $T_1^*$  – полное давление и температура воздуха на входе;  $M_{w1H}$  – число Маха на входе в РК на наружном радиусе в относительном движении;  $\beta_{1H}$  – угол направления относительной скорости потока на входе в РК;  $k$  – показатель изоэнтропы;  $R$  – газовая постоянная воздуха. Исследование правой части выражения (2) на экстремум по углу  $\beta_{1H}$  при  $M_{w1H} = 0,9$  дало оптимальное значение угла  $\beta_{1H \text{ опт}} = 30^\circ$ . Ограничение числа Маха минимизирует волновые потери в межлопаточных диффузорных каналах первого яруса РК согласно обобщенным данным А.Р. Хоуэлла в компрессорных решетках профилей в диапазоне  $M_{кр} - M_{\max}$ .

Применение трехъярусного РК ЦБК с радиальными лопатками на выходе ( $\beta_{2л} = 90^\circ$ ) позволило повысить коэффициенты напора до значений  $\bar{H} = 0,745 - 0,755$  и мощности до  $\mu = 0,9 - 0,915$ , достигнув степени повышения давления  $\pi_k^* = 4,0 \dots 4,5$  при окружной скорости лопаток  $U_2 = 450$  м/с, как и в двухступенчатом осе-ЦБК (ОЦБК), подтвержденные сравнением их характеристик на рисунке [6].



а



б

Рис. – Характеристики ЦБК с трехъярусным РК а и двухступенчатого ОЦБК б

Повышение КПД турбин возможно многопараметрической оптимизацией по семи переменным ( $\bar{U}_1 = U_1/C_s$  – относительная окружная скорость;  $\rho$  – степень реактивности;  $\bar{D}_2 = D_2/D_1$  – диаметрность; углы потока за сопловым аппаратом  $\alpha_1$  и рабочим колесом  $\beta_2$ ; коэффициенты скорости в сопловом аппарате  $\varphi$  и рабочем колесе  $\psi$ ) симплекс – методом с помощью формулы окружного КПД [5].

$$\eta_u = 2\bar{U}_1 \left[ \varphi \sqrt{1-\rho} \cos \alpha_1 + \bar{D}_2 \left( \psi \cos \beta_2 \sqrt{\rho + \varphi^2(1-\rho)} - 2\bar{U}_1 \varphi \sqrt{1-\rho} \cos \alpha_1 + \bar{D}_2^2 \bar{U}_1^2 - \bar{D}_2 \bar{U}_1 \right) \right]. \quad (3)$$

В частности для центробежной турбины (ЦСТ) с параметрами  $\bar{D}_2 = 0,5$ ;  $\bar{U}_1 = 0,705$ ;  $\rho = 0,462$ ;  $\alpha_1 = 11,9^\circ$ ;  $\beta_2 = 12,45^\circ$ ;  $\varphi = 0,98$  и  $\psi = 0,9$  ожидаемое значение КПД  $\eta_u = 0,95$ , а для осевой турбины  $\eta_u = 0,93$  при  $\bar{D}_2 = 1,0$ ;  $\bar{U}_1 = 0,544$ ;  $\rho = 0,2$ ;  $\alpha_1 = 10^\circ$ ;  $\beta_2 = 15^\circ$ ;  $\varphi = 0,98$ ;  $\psi = 0,97$ . Для реализации указанных значений параметров

в ЦСТ малоразмерного ГТД подвод газа к рабочему колесу может быть обеспечен специально спрофилированной улиткой без сопловых лопаток [7].

В качестве регенераторов в энергетических ГТД предпочтительными являются пластинчатые рекуперативные теплообменники или применение системы впрыска пара *STIG* [4], применяемой как для повышения экономичности ГТУ, так и для снижения вредных выбросов в выхлопных газах.

### **Выводы**

Таким образом, повышение эффективного КПД ГТД (1) обеспечивается с одной стороны термодинамическим путем – регенерацией тепла с максимально возможной степенью регенерации  $\beta_p = 0,8...0,9$  при оптимальной степени повышения давления  $\pi_k^* = 4,0...4,5$  и  $T_r^* = 1100...1200$  К, а с другой – газодинамическим – минимизацией гидравлических потерь в проточной части ГТД, в том числе оптимизацией компрессора (2) и турбины (3).

**Список литературы:** 1. Герасименко, В. П. Теорія авіаційних двигунів [Текст]: підручник / В. П. Герасименко. – Х.: ХАІ, 2003. – 199 с. 2. Газотурбинный двигатель Лайкоминг LTS101 мощностью в классе 600 л.с. [Текст] // Новое в зарубежном авиадвигателестроении. ЦИАМ. – 1976. – № 9. – С. 23–29. 3. Транспортные машины с газотурбинными двигателями [Текст]: / Н. С. Попов, С. П. Изотов, В. В. Антонов и др.: под общ. ред. Н. С. Попова. – Л.: Машиностроение, 1987. – 259 с. 4. Герасименко, В. П. Газотурбинные двигатели газоперекачивающих агрегатов. Определение характеристик [Текст]: учеб. пособие / В. П. Герасименко. – Х.: ХАИ, 2012. – 116 с. 5. Комплексное газодинамическое совершенствование двухтактных турбопоршневых транспортных дизелей [Текст] / С. А. Алёхин, В. П. Герасименко, Е. Н. Овчаров, В. А. Опалев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – №10/97. – С. 72–76. 6. Сравнительный анализ одно- и двухступенчатого компрессора для наддува высокофорсированных дизелей [Текст] / С. А. Алёхин, В. П. Герасименко, Ю. А. Анимов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. – № 1. – С. 76–80. 7. Герасименко, В. П. Анализ течения газа в спиральной улитке центростремительной турбины [Текст] / В. П. Герасименко, Н. К. Рязанцев, Б. С. Сотников // Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. тр. – Х.: ХАИ, 1998. – Вып. 5. – С. 135–137.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gerasymenko, V. P. *Teorija aviacijnyh dvyguniv*. Kharkov: HAI, 2003. Print. 2. "Gazoturbinyj dvigatel' Lajkoming LTS101 moshhnost'ju v klasse 600 l.s." *Novoe v zarubezhnom aviadvigatelistroenii*. CIAM 9 (1976): 23–29. Print. 3. Popov, N. S., et al. *Transportnye mashiny s gazoturbinnymi dvigateljami*. Ed. N. S. Popova. Leningrad: Mashinostroenie, 1987. Print. 4. Gerasimenko, V. P. *Gazoturbinnye dvigateli gazoperekachivajushhh agregatov. Opredelenie harakteristik*. Kharkov: HAI, 2012. Print. 5. Aljohin, S. A., et al. "Kompleksnoe gazodinamicheskoe sovershenstvovanie dvouhtaknyh turboporshnevyyh transportnyh dizelej." *Aviacionno-komicheskaja tehnika i tehnologija* 10/97 (2012): 72–76. Print. 6. Aljohin, S. A., V. P. Gerasimenko and Ju. A. Animov. "Srvavitel'nyj analiz odno- i dvuhstupenchatogo kompressora dlja nadduva vysokoforsirovannyh dizelej." *Dvigateli vnutrennego sgoranija* 1 (2007): 76–80. Print. 7. Gerasimenko, V. P., N. K. Rjazancev and B. S. Sotnikov. "Analiz techenija gaza v spiral'noj ulitke centrostremitel'noj turbiny." *Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*. No. 5. Kharkov: HAI, 1998. 135–137. Print.

*Поступила (received) 17.12.2013*