

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО КПД ТУРБОВАЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ ТЕПЛА И ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ РАБОЧЕГО ТЕЛА

© 2011 М. А. Соколов, В. С. Кузьмичев, В. В. Кулагин, И. Н. Крупенич, А. Ю. Ткаченко

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Произведено предварительное исследование влияния регенерации тепла и промежуточного охлаждения рабочего тела на эффективный КПД турбовальных двигателей различных схем.

*КПД эффективный, теплоперепад располагаемый, параметры цикла, регенерация тепла, охлаждение промежуточное.*

Преобразование тепла в работу в газотурбинных двигателях, работающих по циклу Брайтона, сопровождается большими потерями, которые зависят от параметров цикла (гл.5 [1], [2]) и достигают 60...70% и более.

Одним из направлений совершенствования цикла и повышения эффективного КПД ГТД является утилизация тепла выхлопных газов с помощью теплообменника (рис. 1). Такой теплообменник называют рекуператором (лат. recuperate – получить снова) или регенератором (лат. regenerate – восстановить). Применение регенерации на двигателе с высокими параметрами цикла, как будет показано, ведёт за собой и необходимость промежуточного охлаждения рабочего тела. На рис. 2 показана схема взаимодействия узлов такого двигателя на примере трёхвального ТВаД со свободной турбиной и двухвальным газогенератором.

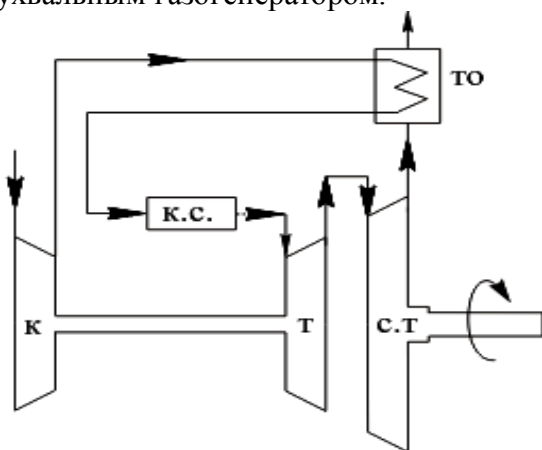


Рис. 1. Схема ТВаД с регенерацией тепла выхлопных газов: то – теплообменник

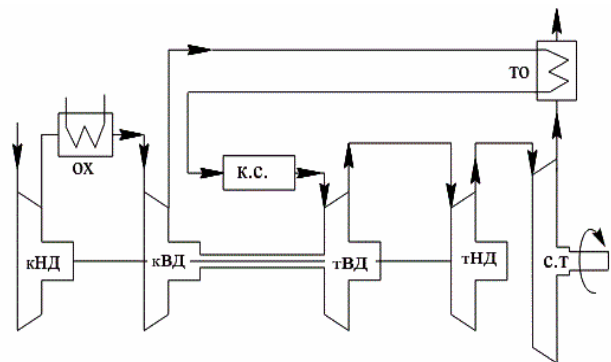


Рис. 2. Схема ТВаД с промежуточным охлаждением и с регенерацией тепла: ох - охладитель

За основу для исследования закономерностей влияния регенерации и промежуточного охлаждения на эффективный КПД взят массив из 30 турбовальных двигателей со свободной турбиной ( $T^*_r=1200...2200\text{K}$ ,  $\pi^*_{к\Sigma}=p^*_k/p^*_v=10...50$ ), рассчитанных на основе НК-36СТ. Реализованные на этом двигателе КПД узлов, коэффициенты потерь, относительные отборы воздуха на охлаждение узлов и некоторые другие коэффициенты приняты одинаковыми для указанного массива двигателей. В случае регенерации и промежуточного охлаждения добавлялись, кроме того, потери полного давления в проточной части коммуникаций, связанных с теплообменником (по 3 % в «холодной» и «горячей» коммуникациях). Изменение  $\pi^*_{к\Sigma}$  осуществлялось за счёт изменения  $\pi^*_{кНД}$  при постоянном произведении  $\pi^*_{кСД} \cdot \pi^*_{кВД}=10$ , как и на исходном двигателе.

### Результаты расчёта исходного массива двигателей

С повышением температуры  $T_{г}^*$  от 1200 до 2000К эффективный КПД, как видно из рис. 3, увеличивается практически от нуля до  $\eta_e=50\%$  (при  $\pi_{к\Sigma}^*=50$ ) или от 20 до 35% (при  $\pi_{к\Sigma}^*=10$ ). Функция  $\eta_e=f(T_{г}^*)$  весьма нелинейна: наибольший прирост КПД имеет место до  $T_{г}^*=1400\text{К}$ , а после 1400К (при  $\pi_{к\Sigma}^*=10$ ) прирост КПД незначительный. А для  $\pi_{к\Sigma}^*=50$  наибольший прирост в диапазоне от 1200 до 1600К. Далее прирост снижается практически до нуля при  $T_{г}^* > 2000\text{К}$ .

С увеличением  $\pi_{к\Sigma}^*$  эффективный КПД повышается тем больше, чем выше температура  $T_{г}^*$ , что объясняется, как известно, уменьшением потерь тепла с выхлопными газами в долях от величины подведённого тепла.

Подчеркнём, что в газотурбинном двигателе без регенерации тепла получить высокий эффективный КПД (порядка 40%) и дальнейшее его увеличение можно только при весьма высоких параметрах цикла ( $\pi_{к\Sigma}^* > 20$  и  $T_{г}^* > 1600\text{К}$ ).

На рис. 4 приведена разность температур газа за турбиной и за компрессором ( $T_{г}^* - T_{к}^*$ ). В общем случае она изменяется от 700К (при  $\pi_{к\Sigma}^*=10$  и  $T_{г}^*=2200$ ) до отрицательной величины (-500К при  $\pi_{к\Sigma}^*=40...50$  и  $T_{г}^*=1000\text{К}$ ). Горизонтальной штрихпунктирной линией отмечена граница, которой соответствует прирост эффективного КПД от введения регенерации, примерно равный 3%. Все модификации, которые располагаются ниже этой линии, будем считать неэффективными.

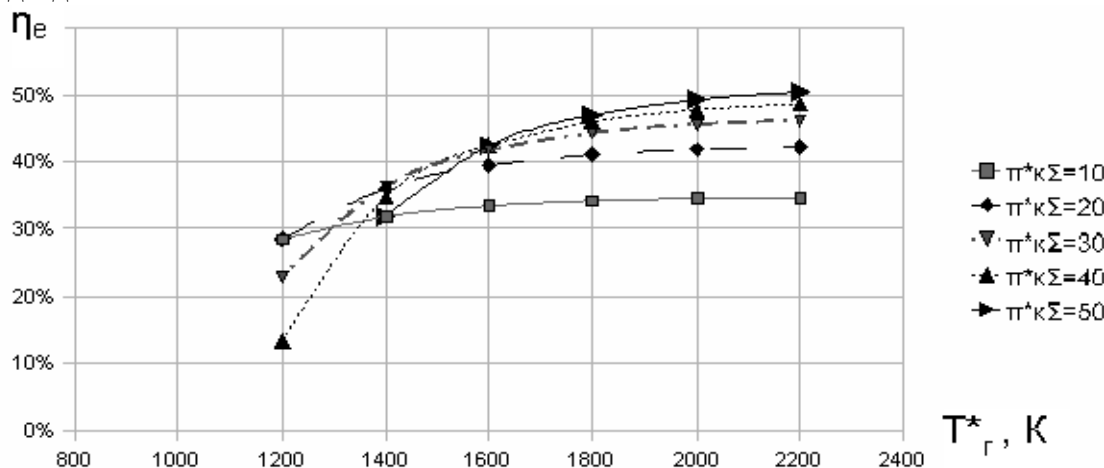


Рис. 3. Эффективный КПД как функция  $T_{г}^*$  и  $\pi_{к\Sigma}^*$

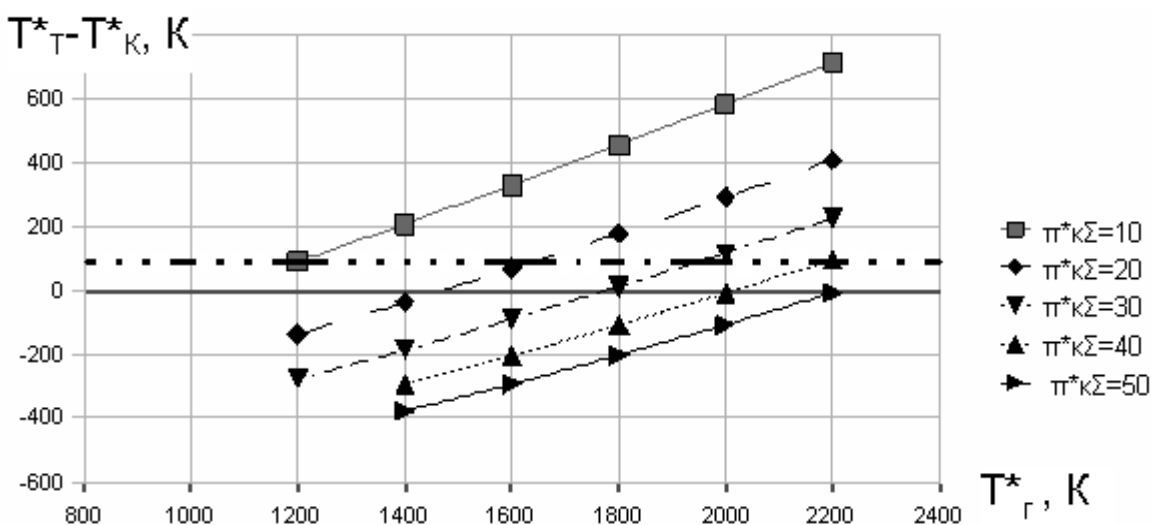


Рис. 4. Температура за компрессором как функция  $T_{г}^*$  и  $\pi_{к\Sigma}^*$

В данной работе были рассчитаны и проанализированы зависимости  $\eta_e=f(T_{г}^*,$

$\pi_{к\Sigma}^*$ ) для 6 типов массивов двигателей, включая исходный массив и 5 его модификаций (табл. 1): два варианта установки регенератора (после свободной турбины и до нее) и, кроме того, для каждого из них два варианта установки охлаждения (с охлаждением перед КВД и с охлаждением перед КСД). Результаты расчёта двигателя с регенератором, установленным за газогенератором, и с охлаждением перед КСД здесь не приведены. Рассчитывались и массивы двигателей с охлаждением рабочего тела, но без регенерации тепла: результаты их здесь также не приведены, так как они практически не оказывают влияния на полученные закономерности изменения эффективного КПД.

Таблица 1. Массивы двигателей

№	Исходный массив	Рег. за св. Т.	Рег. перед св. Т.	Охл. перед к. ВД	Охл. перед к. СД
1	■				
2		■			
3		■		■	
4		■			■
5			■		
6			■	■	

### Результаты расчёта того же массива двигателей с регенерацией тепла выхлопных газов

Регенерация тепла, как следует из рис. 5, принципиально изменяет характер влияния степени повышения давления на эффективный КПД: с увеличением  $\pi_{к\Sigma}^*$  он не повышается (как было показано для исходного массива на рис. 3), а снижается (в основном диапазоне температур: например, при  $T_{г}^*=1450$  К и увеличении  $\pi_{к\Sigma}^*$  от 10 до 50 эффективный КПД снижается вдвое (от 40 до 20%)). Это объясняется снижением располагаемой разности температур ( $T_{г}^*-T_{к}^*$ ), которая оказывает ключевое значение на эффективность регенерации тепла. Чем выше  $\pi_{к\Sigma}^*$  и ниже температура  $T_{г}^*$ , тем меньше располагаемая разность ( $T_{г}^*-T_{к}^*$ ). Она снижается до нуля и становится даже отрицательной при  $\pi_{к\Sigma}^*=20, 30, 40$  и 50 и соответственно  $T_{г}^*<1400, 1800, 2000, 2200$  (рис. 4). Во всех этих случаях регенерация, понятно, не имеет смысла.

Таким образом, на эффективность двигателя с регенерацией тепла при снижении  $\pi_{к\Sigma}^*$  оказывают противоположное влияние два фактора: эффективный КПД исходного двигателя (без регенерации) снижается (рис. 3), а эффективность собственно регенерации  $\Delta\eta_e$  значительно повышается (рис. 6).

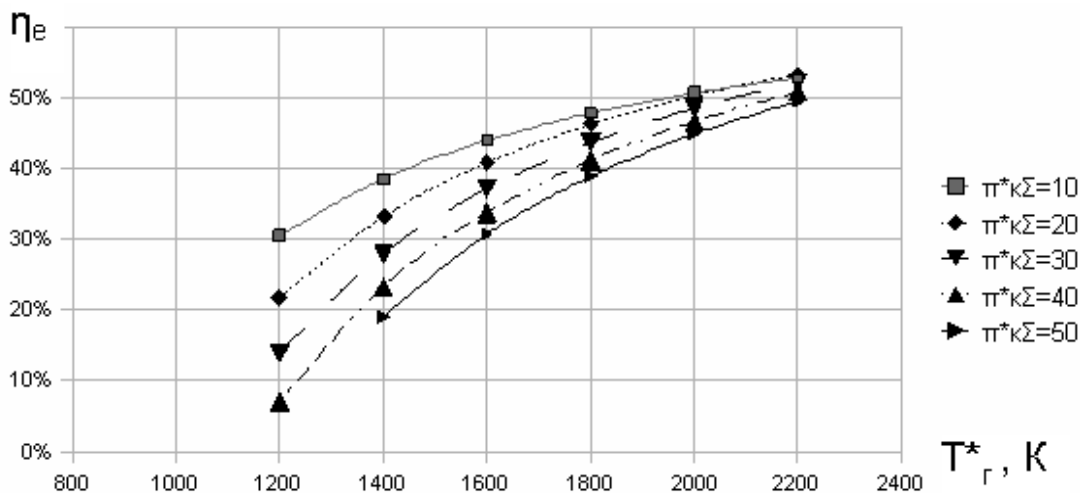


Рис. 5. Эффективный КПД двигателей с регенерацией выхлопных газов как функция  $T_{г}^*$  и  $\pi_{к\Sigma}^*$

Поэтому оптимальная степень повышения давления  $\pi_{k\Sigma}^*$  на двигателе с регенерацией тепла (рис. 7) значительно меньше её значения на двигателе без регенерации ([1, рис. 5.12]) при одной и той же температуре газа. Как видно из представленного рисунка, оптимальная

степень повышения давления на двигателе с регенерацией тепла, при которой обеспечивается максимальное значение эффективного КПД, равна 5, 7 и 12 соответственно при  $T_{г}^*=1000, 1400$  и  $2000\text{К}$ , что в 5...10 раз меньше, чем на двигателе без регенерации.

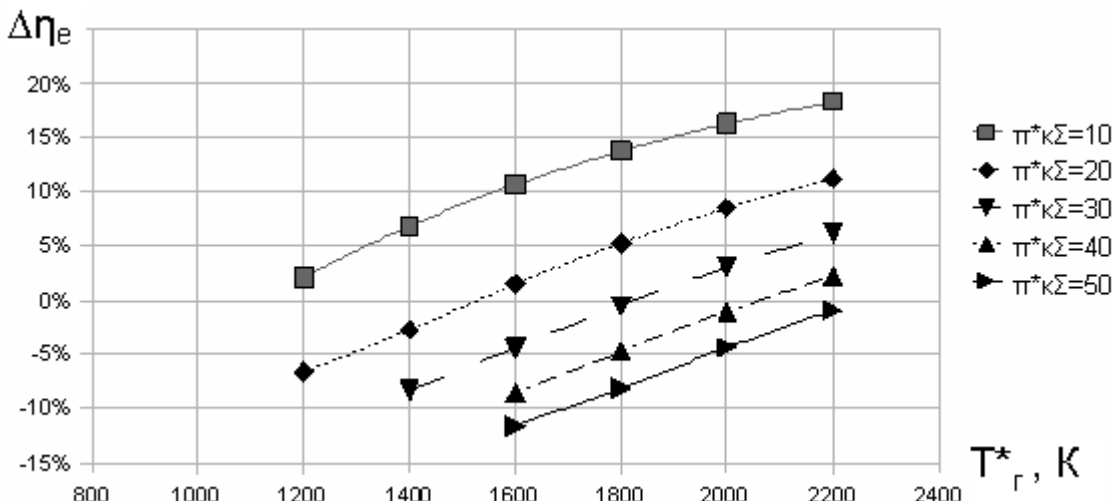


Рис. 6. Разность между эффективными КПД двигателей с регенерацией тепла выхлопных газов и без неё

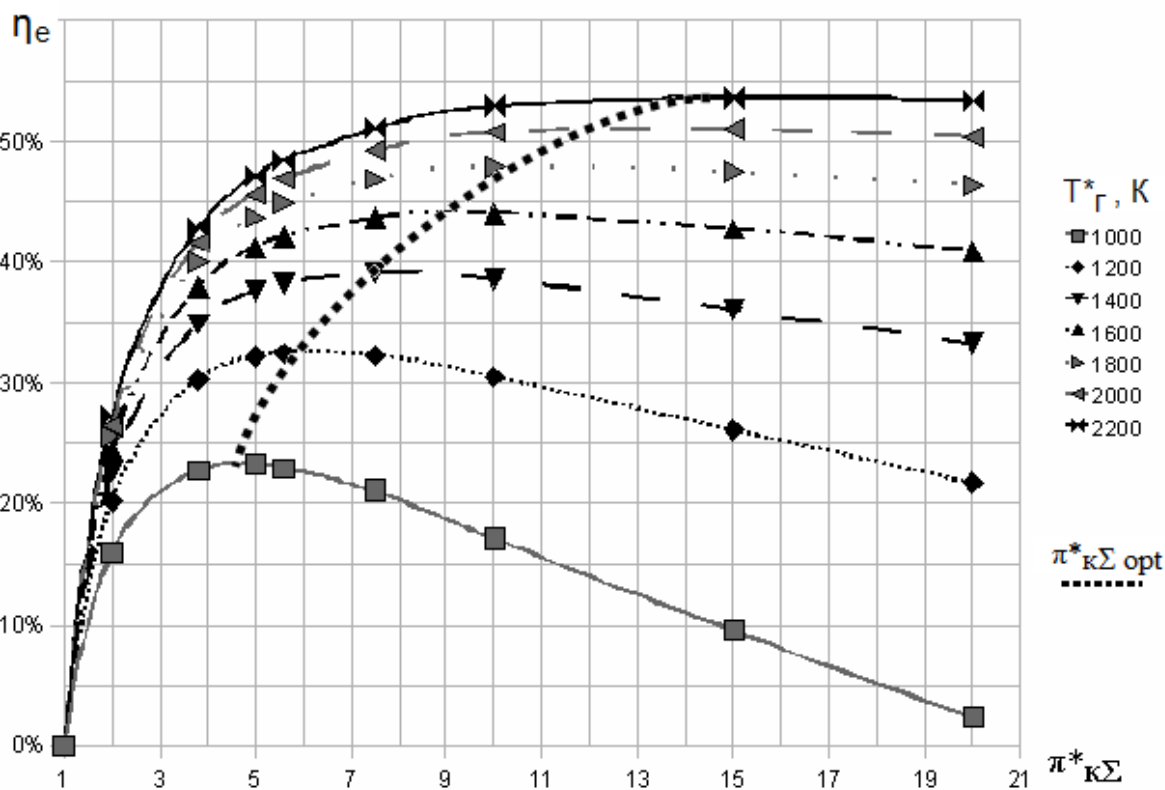


Рис. 7. Эффективный КПД двигателей с регенерацией тепла выхлопных газов как функция  $T_{г}^*$  и  $\pi_{k\Sigma}^*$

Важно подчеркнуть, что за счёт регенерации тепла выхлопных газов можно получить высокий эффективный КПД

( $\eta_e=40..45\%$ ) ТВаД с низкой степенью повышения давления в компрессоре ( $\pi_{k\Sigma}^* \approx 10$ ), но при достаточно высокой

температуре газа перед турбиной ( $T_r^*=1400...1700\text{K}$ ). На двигателе без регенерации тепла такие КПД могут быть получены только при весьма высоких параметрах цикла ( $\pi^*_\Sigma=30...40$  и  $T_r^*=1600...1800\text{K}$ ).

**Результаты расчёта двигателей с регенерацией тепла выхлопных газов и охлаждением рабочего тела перед компрессором ВД**

Результаты расчётов приведены на рис. 8 - 10.

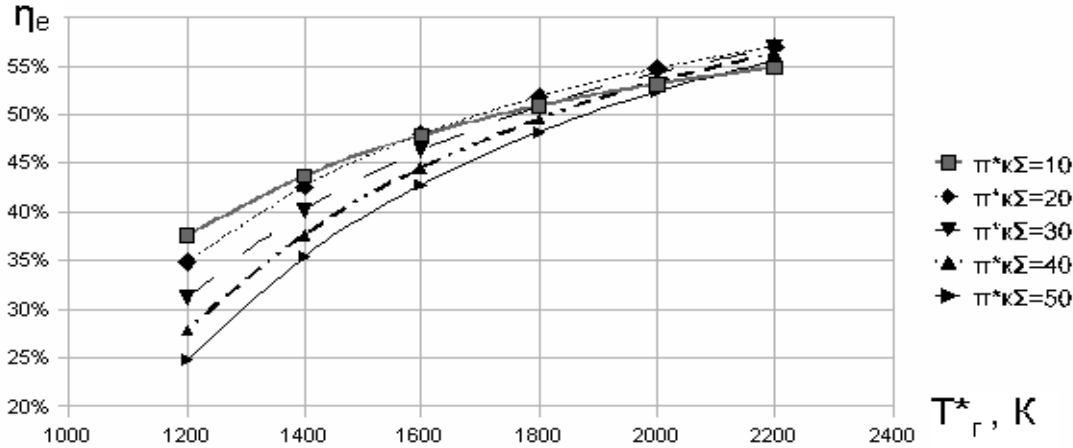


Рис. 8. Эффективный КПД двигателей с регенерацией тепла выхлопных газов и охлаждением рабочего тела перед компрессором ВД

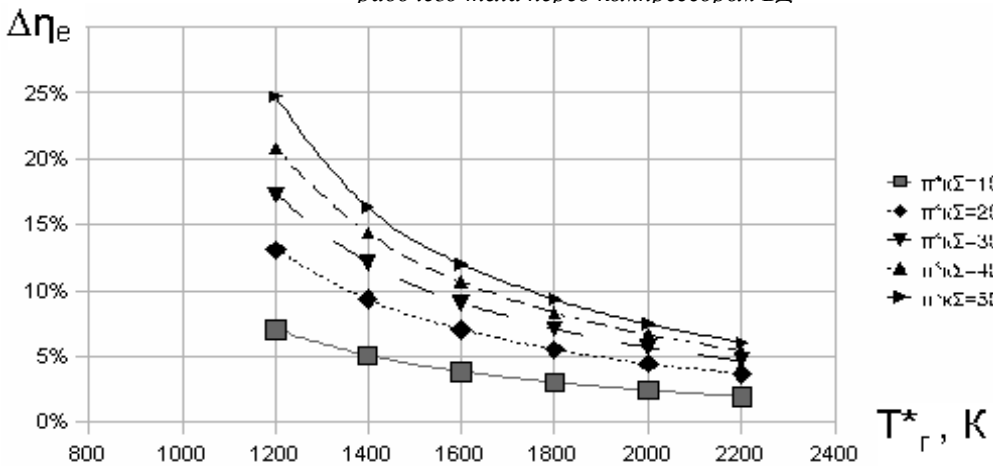


Рис. 9. Изменение эффективного КПД двигателей, обусловленное совместным влиянием регенерации тепла выхлопных газов и охлаждения рабочего тела перед компрессором ВД

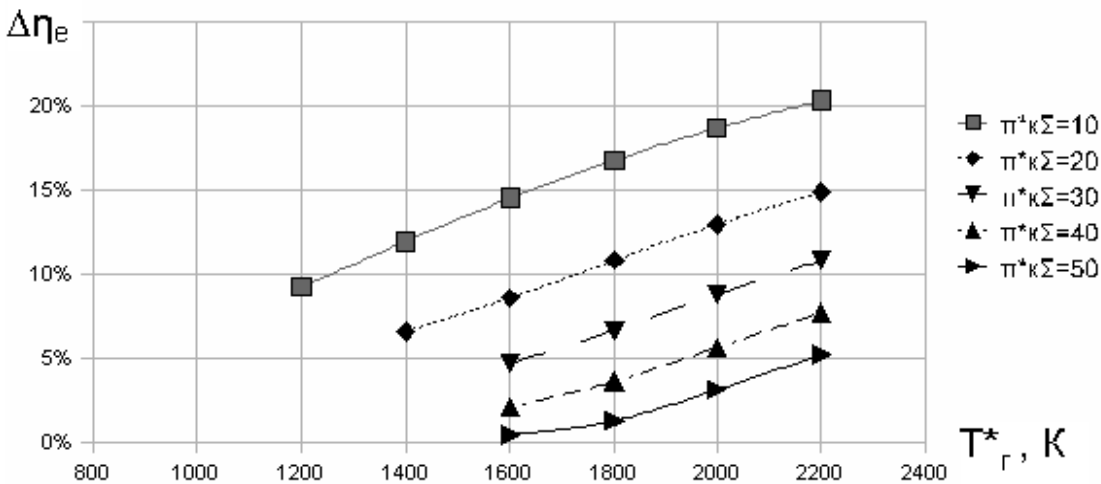


Рис. 10. Изменение эффективного КПД двигателей с регенерацией тепла выхлопных газов под влиянием охлаждения рабочего тела перед компрессором ВД

Расчёты выполнялись при условии, что температура воздуха перед каскадом ВД снижалась от величины  $T_{ВД}^*$  (на двигателе без промежуточного охлаждения) до величины 300К. При этом затраты на охлаждение «Охладителя» (воды) и её прокачку не учитывались, а потери в проточной части теплообменника принимались по 3% в «холодной» и «горячей» коммуникациях.

Из графиков видно, что, во-первых, на двигателях с регенерацией тепла выхлопных газов и промежуточным охлаждением рабочего тела (как и без него) максимальное значение КПД  $\eta_e$  обеспечивается при  $\pi_{к\Sigma}^* \approx 10$  при умеренных значениях температуры  $T_{Г}^* = 1200 \dots 1600$  К. Во-вторых, охлаждение при указанных низких значениях  $\pi_{к\Sigma}^*$  (близких к оптимальным) и температуре газа  $T_{Г}^* = 1200; 1400; 1600$  и 1800 К даёт прирост эффективного КПД соответственно 7; 5; 4 и 3% (рис. 9), а по сравнению с исходным двигателем — 9, 12, 15 и 17% (рис. 10).

В результате при указанных температурах  $T_{Г}^*$  и весьма низкой степени повышения давления ( $\pi_{к\Sigma}^* \approx 10$ ) обеспечиваются значения КПД  $\eta_e = 38; 44; 48$  и 50%. На исходном двигателе такие КПД можно получить, как уже отмечалось, только при весьма высоких параметрах цикла.

### Результаты расчёта двигателей с регенерацией тепла выхлопных газов и охлаждением рабочего тела перед компрессором СД

Как показано в предыдущем разделе, промежуточное охлаждение рабочего тела в процессе его сжатия в компрессоре ведёт к увеличению эффективного КПД двигателя. Естественно, возникает вопрос о выборе места охлаждения: перед каскадом компрессора ВД или СД. Результаты расчётов представлены на рис. 11 и 12.

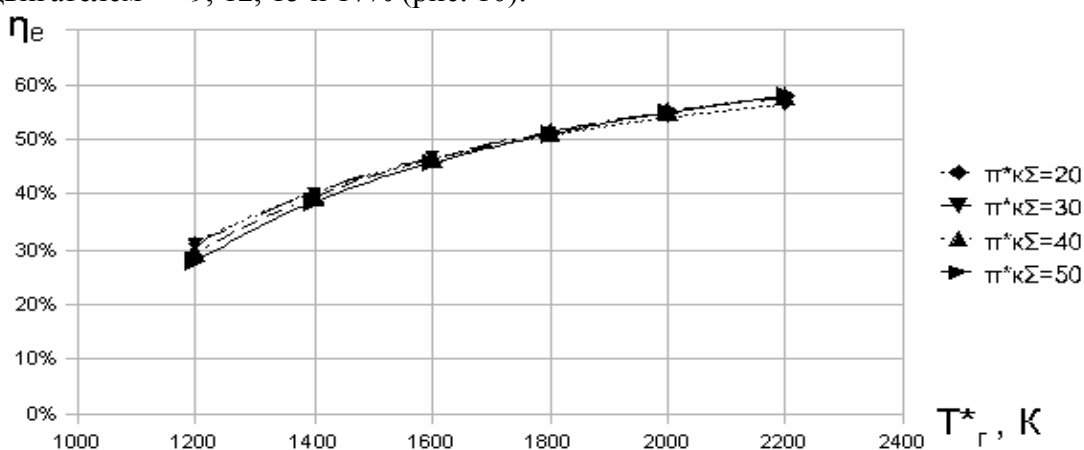


Рис. 11. Эффективный КПД двигателей с регенерацией тепла выхлопных газов и охлаждением рабочего тела перед компрессором СД

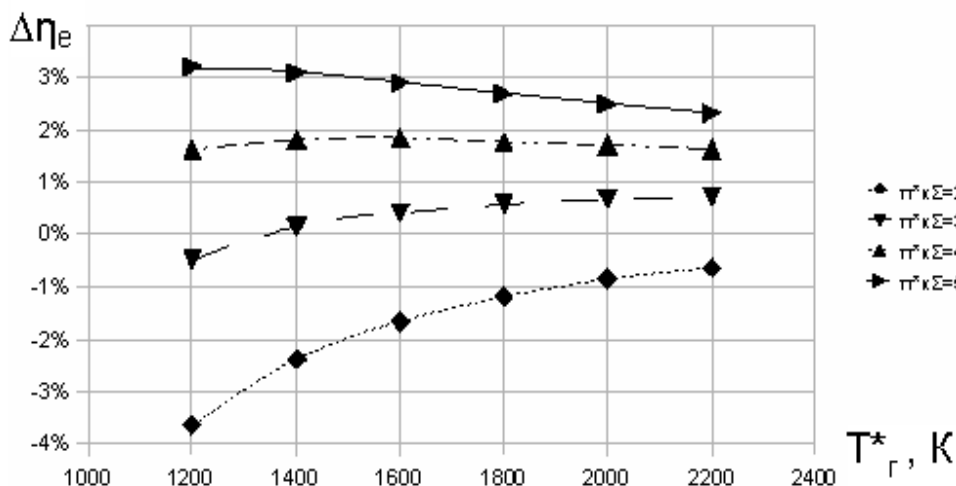


Рис. 12. Изменение КПД двигателя с регенерацией тепла при переносе охлаждения из канала перед КВД в канал перед КСД

При низких  $\pi^*_{к\Sigma}$ , как следует из рис. 12, эффективный КПД в большинстве случаев снижается на 1...4%, что объясняется снижением величины охлаждения воздуха от  $T^*_{кнд}$  до принятого значения температуры воздуха после охлаждения  $T^*_{всд}=300$  К (по сравнению с её снижением от  $T^*_{ксд}$ ). При высоких  $\pi^*_{к\Sigma}=40...50$  он повысился на 2..3%, что, однако, не представляет большого интереса.

### Результаты расчёта массива двигателей с регенератором, установленным за газогенератором (перед свободной турбиной)

Результаты расчёта с такой перестановкой регенератора приведены на рис. 13, 14 и 15.

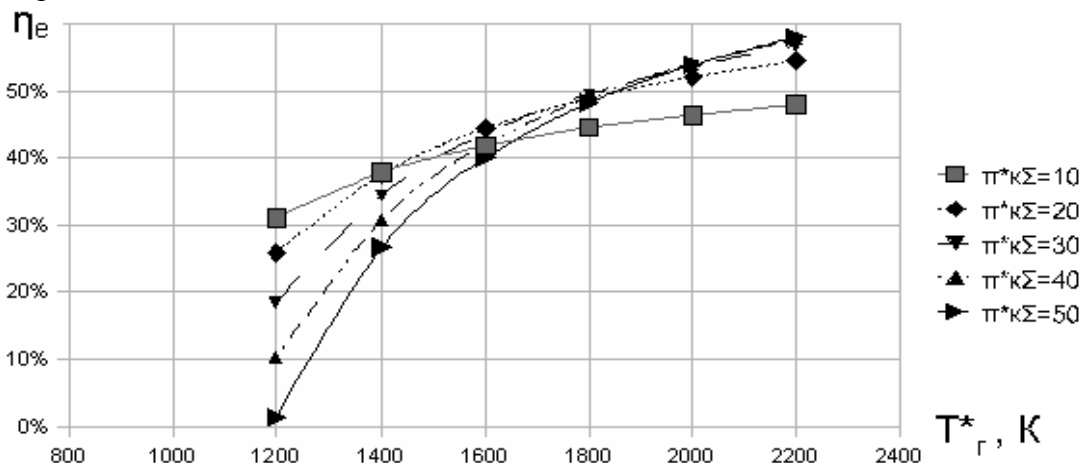


Рис. 13. Эффективный КПД двигателей с регенератором, установленным за газогенератором

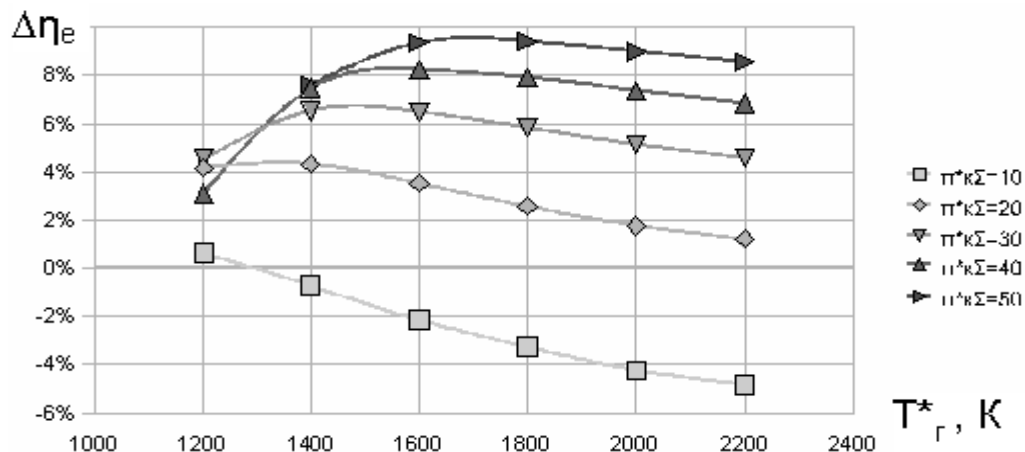


Рис. 14. Влияние перестановки регенератора (за газогенератор) на эффективный КПД двигателей

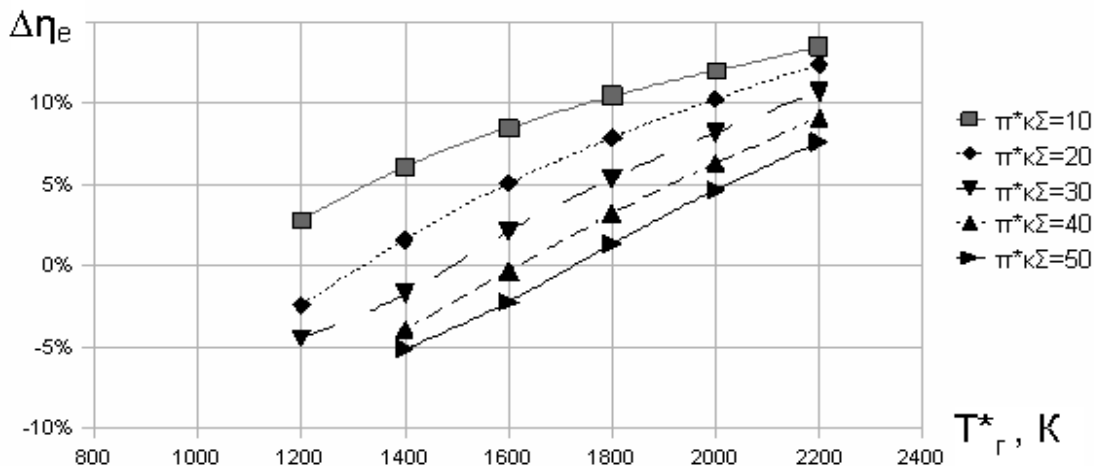


Рис. 15. Разность между эффективным КПД двигателя с регенератором, установленным за газогенератором, и исходного двигателя

Как показано выше, регенерация тепла выхлопных газов становится невозможной в широком диапазоне параметров цикла, где разность температур рабочего тела за свободной турбиной и компрессором ( $T_{г*} - T_{к*}$ ) становится отрицательной (см. рис. 4). Существенно большая величина этой разницы и соответственно более значительный подогрев воздуха за компрессором обеспечивается, если установить регенератор за газогенератором (за турбиной НД — перед свободной турбиной).

Перестановка регенератора на двигателе с высокими параметрами цикла ведёт, как и следовало ожидать, к увеличению эффективного КПД. Он увеличивается на 6; 8; 9 % при, соответственно,  $\pi_{к\Sigma}^* = 30; 40$  и  $50$  и  $T_{г*} = 1400; 1600$  и  $1800$  К (рис. 14), но при низких  $\pi_{к\Sigma}^*$  (порядка 10) эффективный КПД снижается при тех же температурах газа на 1...3%, что объясняется более значительным влиянием уменьшения удельной мощности свободной турбины из-за уменьшения температуры газа перед ней в условиях низкого значения  $\pi_{св-т}^*$ .

### Выводы

1. За счёт регенерации тепла выхлопных газов можно обеспечить такой же высокий эффективный КПД  $\eta_e = 40..45\%$ , как и на двигателях с весьма высокими параметрами цикла ( $T_{г*} = 1600..1800$  К;  $\pi_{к\Sigma}^* = 30..40$ ), но при низкой степени повышения давления  $\pi_{к\Sigma}^* \approx 10$  и достаточно высокой температуре газа перед турбиной  $T_{г*} = 1400..1700$  К.

2. Промежуточное охлаждение рабочего тела перед компрессором ВД (дополнительно к регенерации) позволит повысить эффективный КПД ещё на 5...3% соответственно при температурах  $T_{г*} = 1400..1700$  К и  $\pi_{к\Sigma}^* \approx 10$ .

3. Проведённое исследование является предварительным. Проект двигателя с регенерацией тепла и промежуточным охлаждением требует конструкторской проработки, тщательного гидравлического расчёта проточной части коммуникаций теплообменников и экспериментальной проверки этих расчётов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки), на основании постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

### Библиографический список

1. Кулагин, В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок [Текст]: учеб. В 3 кн. Кн.1: /В.В. Кулагин.- 2-е изд. - Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ. Кн.2. Основы теории ГТД. Совместная работа узлов выполненного двигателя и его характеристики. М.: Машиностроение, 2003. - 615 с.

2. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок [Текст]: учебник. В 3 кн. Кн.3: Основные проблемы: начальный уровень проектирования, газодинамическая доводка, специальные характеристики и конверсия авиационных ГТД / В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев [и др.]; под общ. ред. В.В. Кулагина. -М.: Машиностроение, 2005. - 462 с.

3. Формирование математической модели двигателя-прототипа и проектный расчет ГТД с использованием автоматизированной системы расчета и анализа (АСТРА ПР) [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.В. Кулагин, В.С. Кузьмичев, С.К. Бочкарев [и др.] – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2006. - 76 с.

## PRELIMINARY STUDY OF PRINCIPLES OF EFFECTIVE EFFICIENCY CHANGE OF TURBOSHAFT ENGINES OF VARIOUS SCHEMES WITH HEAT RECOVERY AND INTERMEDIATE COOLING OF WORKING MEDIUM

© 2011 M. A. Sokolov, V. S. Kuzmichev, V. V. Kulagin, I. N. Krupenich, A. Y. Tkachenko

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov  
(National Research University)

Preliminary study of heat recovery and intermediate cooling of working medium effect over the turboshaft engine effective efficiency is carried out.



*Effective efficiency, available heat drop, cycle parameters, heat recovery, intermediate cooling of working medium.*

### Информация об авторах

**Соколов Максим Алексеевич**, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [mxpain@yandex.ru](mailto:mxpain@yandex.ru). Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, проектирование ГТД.

**Кулагин Виктор Владимирович**, кандидат технических наук, профессор кафедры теории двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kulvv@ssau.ru](mailto:kulvv@ssau.ru). Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, начальный уровень проектирования ГТД, идентификация математических моделей ГТД.

**Кузьмичев Венедикт Степанович**, доктор технических наук, профессор кафедры теории двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kuzm@ssau.ru](mailto:kuzm@ssau.ru). Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, начальный уровень проектирования ГТД, определение научно-технического уровня ГТД, САПР ГТД.

**Крупенич Илья Николаевич**, кандидат технических наук, ассистент кафедры теории двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kru@ssau.ru](mailto:kru@ssau.ru). Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, проектирование турбокомпрессора ГТД, численные методы оптимизации.

**Ткаченко Андрей Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры теории двигателей, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [tau@ssau.ru](mailto:tau@ssau.ru). Область научных интересов: теория газотурбинных двигателей, математическое моделирование, управление ГТД, эксплуатационные характеристики ГТД, численные методы оптимизации.

**Sokolov Maxim Alekseevich**, student, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [mxpain@yandex.ru](mailto:mxpain@yandex.ru). Area of research: gas turbine engines theory, gas turbine engine design.

**Kulagin Viktor Vladimirovich**, candidate of technical sciences, professor of Aircraft Engine Theory Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [kulvv@ssau.ru](mailto:kulvv@ssau.ru). Area of research: gas turbine engines theory, initial level of gas turbine engine design, identification of mathematical model of gas turbine engines.

**Kuzmichev Venedikt Stepanovich**, doctor of technical sciences, professor of Aircraft Engine Theory Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [kuzm@ssau.ru](mailto:kuzm@ssau.ru). Area of research: gas turbine engines theory, initial level of gas turbine engine design, assessment of scientific and technological level of gas turbine engines, gas turbine engines computer-aided systems.

**Krupenich Iliya Nikolaevich**, candidate of technical sciences, junior member of teaching staff of Aircraft Engine Theory Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [kru@ssau.ru](mailto:kru@ssau.ru). Area of research: gas turbine engines theory, mathematical simulation, gas turbine engine's turbocompressor design, numbering method of optimization.

**Tkachenko Andrey Yurievich**, candidate of technical sciences, associate professor of Aircraft Engine Theory Department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: [tau@ssau.ru](mailto:tau@ssau.ru). Area of research: gas turbine engines theory, mathematical simulation, gas turbine engine controlling, design methods of field-performance data, numerical method of optimization.