

CRITERION TO EFFECTIVE OF GAS TURBINE OF COMPLEX CYCLE WITH INTERMEDIATE HEATING AND FREE TURBINE

V. A. Ivanov

JSC "UEC-Aviadvigatel"

iva-perm@rambler.ru

Submitted 2022, May 27

Abstract. It is shown physical sense and is given theoretical reason of increase effective efficiency gas turbine of complex cycle with intermediate heating in compare with gas turbine of simple cycle by use of maximum of degree reduction of pressure in free turbine as criterion to effective. Increase of effective efficiency of gas turbine of complex cycle is considered in interval of increase degree increase of pressure in cycle from corresponding to maximum of degree reduction of pressure in free turbine gas turbine of simple cycle before corresponding to absolute maximum of this parameter in gas turbine of complex cycle. It is shown physical sense of degree increase of pressure, corresponding to absolute maximum offered criterion to effective.

Keywords: simple cycle; complex cycle; intermediate heating; effective efficiency.

КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГТУ СЛОЖНОГО ЦИКЛА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ПОДОГРЕВОМ И СВОБОДНОЙ ТУРБИНОЙ

В. А. Иванов

ОА «ОДК-Авиадвигатель»

iva-perm@rambler.ru

Поступила в редакцию 27.05.2022

Аннотация. Показан физический смысл и дано теоретическое обоснование повышения эффективного коэффициента полезного действия газотурбинных установок (КПД ГТУ) сложного цикла с промежуточным подогревом при использовании максимума степени понижения давления в свободной турбине как критерия эффективности по сравнению с ГТУ простого цикла. Повышение эффективного КПД ГТУ сложного цикла рассмотрено в интервале увеличения степени повышения давления в цикле от соответствующей максимуму степени понижения давления в свободной турбине ГТУ простого цикла до соответствующей абсолютному максимуму этого параметра в ГТУ сложного цикла. Показан физический смысл степени повышения давления, соответствующей абсолютному максимуму предложенного критерия эффективности.

Ключевые слова: простой цикл; сложный цикл; промежуточный подогрев; эффективный КПД.

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] показана эффективность использования в ГТУ сложного цикла с промежуточным подогревом (далее просто сложного цикла) условия равенства эффективных КПД простого и сложного циклов, заключающаяся в достижении максимума работы и эффективного КПД сложного цикла при степени повышения давления (СПД), оптимальной по эффективному КПД простого цикла. Это является принципиальным отличием от простого цикла, в котором СПД, оптимальная по эффективному КПД, значительно больше оптимальной по работе цикла, что делает достижение максимума эффективного КПД нереальным. Так как схемы ГТУ, созданных на базе современных судовых и авиационных ГТД, обычно включают свободную силовую турбину, то в работе [2] предложено вместо упомянутого равенства эффективных КПД использовать максимум степени понижения давления в свободной турбине (СТ), как собственный критерий эффективности проектирования ГТУ сложного цикла.

При использовании этого критерия эффективности обеспечивается увеличение работы и эффективного КПД ГТУ сложного цикла по сравнению с этими параметрами ГТУ простого цикла в интервале увеличения СПД от соответствующей максимуму степени понижения давления в СТ ГТУ простого цикла до соответствующей абсолютному максимуму этого параметра в ГТУ сложного цикла.

ЦЕЛЬ

Показать физический смысл и теоретически обосновать повышение эффективного КПД ГТУ сложного цикла по сравнению с ГТУ простого цикла при использовании максимума степени понижения давления в свободной турбине, как критерия эффективности, вместо равенства эффективных КПД простого и сложного циклов. Показать также физический смысл СПД, соответствующей абсолютному максимуму предложенного критерия эффективности.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Решение поставленных задач выполним при условии обеспечения в процессе проектирования одинаковых потерь энергии в ГТУ простого и сложного циклов, которое обеспечим при одинаковых КПД и одинаковой нагрузке турбин компрессора ГТУ сложного цикла и ступеней турбины компрессора ГТУ простого цикла [2]. Для свободных турбин, имеющих разную нагрузку, используем принцип одинаковой эффективности использования свободной энергии, реализуемый также при одинаковых КПД этих турбин.

Степень повышения температуры перед турбинами компрессора ГТУ сложного цикла прием одинаковой и равной ее величине в ГТУ простого цикла. Для упрощения простой и сложный циклы ГТУ рассмотрим как действительные циклы с идеальным газом, газовая постоянная, показатель адиабаты и теплоемкость которого остаются неизменными.

На рис. 1 показаны схемы ГТУ простого и сложного циклов со свободной турбиной. В ГТУ сложного цикла между турбинами высокого T_1 и низкого T_2 давления расположена вторая камера сгорания $КС2$.

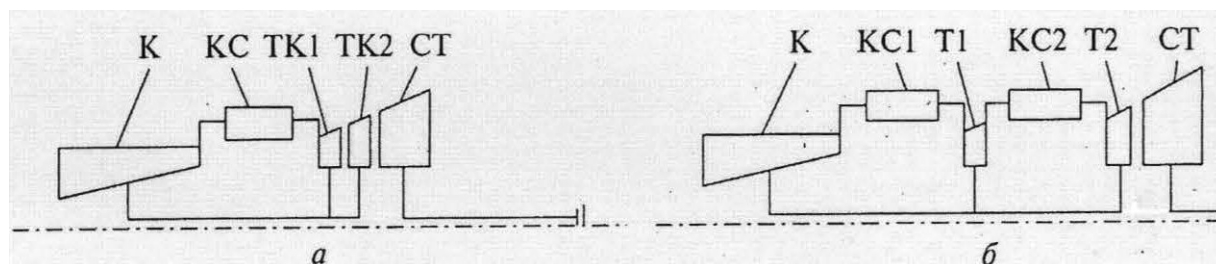


Рис. 1. Схемы ГТУ простого (а) и сложного (б) циклов со свободной турбиной

Введем обозначения: k – компрессор; $k.c$ – камера сгорания; $тк$ – турбина компрессора ГТУ простого цикла; t – турбина компрессора ГТУ сложного цикла; $ст$ – свободная турбина ГТУ простого и сложного цикла; p^* , T – полное давление и температура заторможенного потока; C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; a – окружающая атмосфера; γ – газ; v – воздух; κ – показатель адиабаты (принято $\kappa = \kappa_\gamma = \kappa_v = 1,4$); $опт$ – оптимальный; e – эффективный; ε – эквивалентный; $\theta = T_\gamma^*/T_a$ – степень повышения температуры в простом и сложном цикле при $T_a = 288$ К; $\pi^* = p_k^*/p_a$ – степень повышения давления (СПД) в простом и сложном цикле; $\pi_{тк1}^* = p_k^*/p_{тк1}^*$ ($\pi_{т1}^* = p_k^*/p_{т1}^*$) – степень понижения давления в первой турбине ГТУ простого (сложного) цикла; $\pi_{ст1-1}^* = p_{тк2}^*/p_a$ ($\pi_{ст1-2}^* = p_{т2}^*/p_a$) – степень понижения давления в СТ ГТУ простого (сложного) цикла; $e = \pi^{*(\kappa-1)/\kappa}$; $e_{тк1} = \pi_{тк1}^{*(\kappa-1)/\kappa}$; $e_{ст1-1} = \pi_{ст1-1}^{*(\kappa-1)/\kappa}$; $e_{ст1-2} = \pi_{ст1-2}^{*(\kappa-1)/\kappa}$; η – КПД цикла и процессов сжатия (расширения) в цикле.

В работе [2] и на рис. 2, приведенном далее, показано, что максимум степени понижения давления в СТ ГТУ сложного цикла $\pi_{ст1-2max}^*$ и равенство эффективных КПД простого (цикл 1-1) и сложного (цикл 1-2) циклов $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$ являются эквивалентными критериями эффективности, а работа сложного цикла – максимальной при СПД $\pi_{оптст1-1}^*$, соответствующей максимуму степени понижения давления в СТ ГТУ простого цикла $\pi_{ст1-1max}^*$. Рассмотрим обеспечение эквивалентности этих критериев эффективности при СПД, отличающихся от упомянутой СПД $\pi_{оптст1-1}^*$. Эквивалентность рассматриваемых критериев эффективности $\pi_{ст1-2max}^*$ и $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$ будет обеспечена при равенстве параметров

$$\pi_{т1оптст1-2}^* = \pi_{т1равн\eta e}^* (e_{т1оптст1-2} = e_{т1равн\eta e}). \quad (1)$$

Учтем, что при данной СПД максимум степени понижения давления в СТ ГТУ сложного цикла $\pi_{ст1-2max}^*$ достигается при оптимальной степени понижения давления в первой турбине (первой ступени цикла) этой ГТУ $\pi_{т1оптст1-2}^* (e_{т1опт e ст1-2})$ [2]

$$e_{т1оптст1-2} = 1 / (1 - \frac{e-1}{2\theta\eta_k\eta_{т1}}), \quad (2)$$

где $\eta_{т1}$ – КПД первой турбины ГТУ простого и сложного циклов.

Учтем также, что равенство эффективных КПД ГТУ простого и сложного циклов $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$ достигается при параметре $\pi_{т1равн\eta e}^* (e_{т1равн\eta e})$ [1]

$$e_{т1равн\eta e} = (\eta_{т1}/\eta_{т\Sigma})e(1 - \eta_{e1-1}), \quad (3)$$

где $\eta_{т\Sigma}$ – общий КПД турбин ГТУ простого цикла.

Как видно из формул (2) и (3), величина параметров $e_{т1оптст1-2}$ и $e_{т1равн\eta e}$ зависит от КПД первой турбины $\eta_{т1}$. Тогда найдем КПД $\eta_{т1}$, при котором обеспечивается равенство (1). Подставим в равенство (1) формулы (2) и (3) и после преобразований получим уравнение

$$2\theta\eta_k\eta_{т1}e(1 - \eta_{e1-1}) - e(e-1)(1 - \eta_{e1-1}) - 2\theta\eta_k\eta_{т\Sigma} = 0,$$

из которого найдем искомый КПД, при котором обеспечивается эквивалентность рассматриваемых критериев эффективности

$$\eta_{т1э.кр} = \frac{\eta_{т\Sigma}}{e(1 - \eta_{e1-1})} + \frac{(e-1)}{2\theta\eta_k}. \quad (4)$$

Затем покажем обеспечение эквивалентности рассматриваемых критериев эффективности при СПД $\pi_{оптст1-2}^* (e_{оптст1-2})$, соответствующей абсолютному максимуму степени понижения

давления в СТ ГТУ сложного цикла $\pi_{ст1-2абс.макс}^*$ и практически максимуму эффективного КПД $\eta_{e1-2max}$. Для этого, преобразуя известную формулу этой СПД [2],

$$e_{оптст1-2} = (2\theta\eta_k\eta_{т1} + 1) / 3, \quad (5)$$

найдем КПД $\eta_{т1}$, соответствующий этой СПД, и, приравняв его КПД $\eta_{т1э.кр}$, получим уравнение

$$\frac{3e - 1}{2\theta\eta_k} = \frac{\eta_{т\Sigma}}{e(1 - \eta_{e1-1})} + \frac{e - 1}{2\theta\eta_k}$$

из которого найдем новую формулу СПД (параметр e), при которой обеспечивается абсолютный максимум параметра $\pi_{ст1-2абс.макс}^*$ и равенство эффективных КПД $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$, т.е. эквивалентность рассматриваемых критериев эффективности

$$e_{э.кр} = \sqrt{\frac{\theta\eta_k\eta_{т\Sigma}}{(1 - \eta_{e1-1})}}. \quad (6)$$

В то же время найденный параметр $e_{э.кр}$ должен соответствовать параметру $e_{оптст1-2}$, т.е. должно обеспечиваться равенство

$$e_{э.кр} = e_{оптст1-2}. \quad (7)$$

Так как формула (6) идентична известной формуле СПД $\pi_{опт\eta_{e1-1}}^*$ ($e_{опт\eta_{e1-1}}$), соответствующей максимуму эффективного КПД простого цикла $\eta_{e1-1max}$ [3], то $e_{э.кр} = e_{опт\eta_{e1-1}}$ и вместо равенства (7) можно записать равенство

$$e_{опт\eta_{e1-1}} = e_{оптст1-2}, \quad (8)$$

которое соответствует равенству эффективных КПД

$$\eta_{e1-1max} = \eta_{e1-2max}.$$

Так как параметры $e_{опт\eta_{e1-1}}$, $e_{э.кр}$ и $e_{оптст1-2}$, согласно формуле (6), зависят от КПД η_k и $\eta_{т\Sigma}$, то равенство (8) можно обеспечить, увеличивая СПД $e_{опт\eta_{e1-1}}$ и эффективный КПД простого цикла $\eta_{e1-1max}$ за счет повышения КПД компрессора η_k или общего КПД турбин $\eta_{т\Sigma}$ этого цикла. Тогда, преобразуя формулу (6), найдем произведение КПД $\eta_k\eta_{т\Sigma}$, обеспечивающее равенство (8),

$$\eta_k\eta_{т\Sigma} = \frac{e^2(1 - \eta_{e1-1})}{\theta}, \quad (9)$$

где $e = e_{оптст1-2}$, $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$.

Выбор одного из КПД произведения $\eta_k\eta_{т\Sigma}$ для нахождения увеличенных значений СПД $\pi_{опт\eta_{e1-1}}^*$ и КПД $\eta_{e1-1max}$ не имеет принципиального значения, так как не оказывает влияния на величину этих параметров. Как показал расчетный анализ, равенство (8) и соответствующее ему равенство эффективных КПД $\eta_{e1-1max} = \eta_{e1-2max}$ обеспечивается за счет повышения КПД компрессора η_k ГТУ простого цикла, который найдем по формуле (9) при $\eta_{т\Sigma} = const$.

При величине СПД ниже упомянутых оптимальных значений $\pi_{оптст1-2}^*$ и $\pi_{опт\eta_{e1-1}}^*$ эквивалентность рассматриваемых критериев эффективности обеспечивается также за счет повышения КПД компрессора, которое найдем из обеспечения равенства КПД $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$. Подставив в это равенство известное выражение эффективного КПД простого цикла [4]

$$\eta_{e1-1} = (e - 1)(\theta\eta_k\eta_{T\Sigma}/e - 1)/\eta_k[\theta - (e - 1)/\eta_k - 1],$$

после преобразований получим уравнение

$$\eta_k [\eta_{e1-2} e (\theta - 1) - \theta\eta_{T\Sigma}(e - 1)] + e (e - 1)(1 - \eta_{e1-2}) = 0,$$

из которого найдем искомый КПД компрессора ГТУ простого цикла

$$\eta_k = \frac{1 - \eta_{e1-2}}{\theta\eta_{T\Sigma}/e - \eta_{e1-2}(\theta - 1)/(e - 1)}. \tag{10}$$

На рис. 2 показана зависимость от СПД эффективного КПД η_e , удельной работы \bar{L}_e и других параметров ГТУ простого и сложного цикла при критерии эффективности $\pi_{ст1-2max}^*$. Здесь $\bar{L}_e = L_e/(C_p T_a)$ – относительная удельная работа (далее просто работа) ГТУ простого и сложного циклов (отнесенная к произведению теплоемкости на температуру атмосферного воздуха). Параметры ГТУ простого и сложного циклов со свободной турбиной найдены по формулам, полученным в [2]. Повышение КПД компрессора ГТУ простого цикла найдено по формулам (9) и (10) при $\eta_{T\Sigma} = const$.

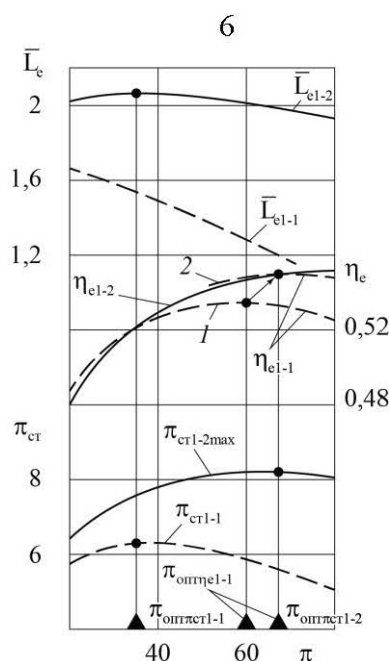


Рис. 2. Зависимость параметров ГТУ простого и сложного циклов со свободной турбиной от степени повышения давления в цикле ($\theta_1 = \theta_2 = \theta = 6$; $\eta_k = 0,85$; $\eta_{T1} = \eta_{T2} = 0,88$; $\eta_{ст} = 0,95$):
 --- – ГТУ простого цикла; — – ГТУ сложного цикла при использовании критерия эффективности $\pi_{ст1-2max}^*$; • – максимум, абсолютный максимум; 1 – КПД простого цикла при $\eta_k = 0,85$; 2 – КПД простого цикла при $\eta_k = 0,88$; —> – повышение КПД ГТУ простого цикла $\eta_{e1-1max}$ при повышении КПД компрессора этой ГТУ с $\eta_k = 0,85$ до $\eta_k = 0,88$

Как видно из рис. 2, при СПД $\pi_{оптст1-2}^* = 67$ за счет достижения параметра $\pi_{ст1-2абс.max}^*$ обеспечивается повышение эффективного КПД ГТУ сложного цикла η_{e1-2} , соответствующее повышению максимального эффективного КПД ГТУ простого цикла $\eta_{e1-1max}$ при повышении КПД компрессора этой ГТУ с $\eta_k = 0,85$ до $\eta_k = 0,88$.

Таким образом, физический смысл СПД $\pi_{оптст1-2}^*$, соответствующей абсолютному максимуму степени понижения давления в СТ ГТУ сложного цикла $\pi_{ст1-2абс.max}^*$, заключается в ее равенстве СПД $\pi_{опт\eta e1-1}^*$, увеличенной за счет упомянутого повышения КПД компрессора η_k ГТУ простого цикла.

Заметим, что потери энергии в турбокомпрессоре приводят к уменьшению степени понижения давления в свободной турбине и к ее увеличению при уменьшении этих потерь или уменьшении их влияния. Подвод теплоты между турбинами компрессора приводит к увеличению степени понижения давления в СТ ГТУ сложного цикла. Если при этом эффективный КПД этой ГТУ становится больше эффективного КПД ГТУ простого цикла, то обеспечивается уменьшение влияния потерь энергии в турбокомпрессоре на параметры ГТУ сложного цикла.

На рис. 3 показано обеспечение эквивалентности критериев эффективности $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$ и $\pi_{cr1-2max}^*$ при СПД $\pi_{опт\eta_{e1-1}}^*$, соответствующей $\eta_k = 0,85$. Повышение КПД компрессора ГТУ простого цикла найдено по формуле (9).

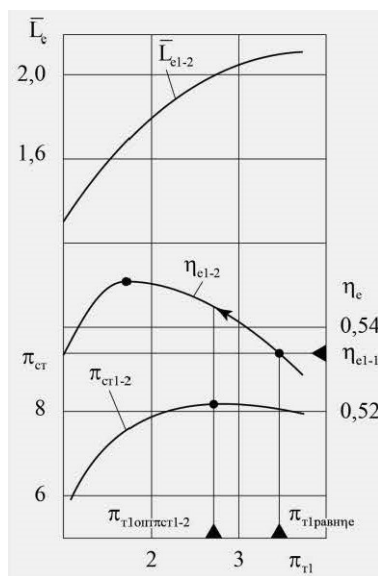


Рис. 3. Зависимость параметров ГТУ сложного цикла со свободной турбиной от степени понижения давления в первой турбине компрессора (первой ступени сложного цикла) при СПД $\pi_{опт\eta_{e1-1}}^* = 60$ (условия см. на рис. 2):
 • – максимум; \longrightarrow – повышение КПД ГТУ простого цикла η_{e1-1} при повышении КПД компрессора этой ГТУ с $\eta_k = 0,85$ до $\eta_k = 0,87$

Как видно из рис. 3, при увеличении параметра π_{t1}^* и промежуточного подвода теплоты увеличивается степень понижения давления в свободной турбине π_{cr1-2}^* и, как следствие, работа и эффективный КПД сложного цикла. При параметре $\pi_{t1опт\pi_{cr1-2}}^*$ обеспечивается повышение КПД простого цикла η_{e1-1} до его равенства КПД сложного цикла η_{e1-2} за счет повышения КПД компрессора ГТУ простого цикла с $\eta_k = 0,85$ до $\eta_k = 0,87$.

Таким образом, физический смысл повышения эффективного КПД ГТУ сложного цикла по сравнению с ГТУ простого цикла при увеличении степени понижения давления в свободной турбине до $\pi_{cr1-2max}^*$ заключается в уменьшении влияния потерь энергии в турбокомпрессоре на параметры ГТУ сложного цикла, а эквивалентность рассматриваемых критериев эффективности при увеличении СПД в интервале от $\pi_{опт\pi_{cr1-1}}^*$ до $\pi_{опт\pi_{cr1-2}}^*$ обеспечивается за счет повышения КПД компрессора и эффективного КПД η_{e1-1} ГТУ простого цикла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Повышение эффективного КПД ГТУ сложного цикла η_{e1-2} с промежуточным подогревом при увеличении степени понижения давления в свободной турбине до максимума $\pi_{cr1-2max}^*$ по сравнению с ГТУ простого цикла η_{e1-1} происходит в результате уменьшения влияния потерь энергии в турбокомпрессоре на этот КПД η_{e1-2} и соответствует обеспечению равенства

ства эффективных КПД $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$ при повышении КПД компрессора η_k и эффективного КПД η_{e1-1} ГТУ простого цикла. Таким образом обеспечивается эквивалентность критериев эффективности $\pi_{сг1-2max}^*$ и $\eta_{e1-1} = \eta_{e1-2}$.

2. При абсолютном максимуме степени понижения давления в свободной турбине ГТУ сложного цикла $\pi_{сг1-2абс.max}^*$ обеспечивается равенство СПД, соответствующей этому максимуму $\pi_{оптспг1-2}^*$, и СПД, оптимальной по эффективному КПД ГТУ простого цикла $\pi_{опт\eta_{e1-1}}^*$, увеличенной при повышении КПД компрессора η_k и эффективного КПД η_{e1-1} этой ГТУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов В. А.** Путь увеличения эффективности цикла газотурбинных установок // Вестник СГАУ. 2009. № 3 (19). С. 102–108. [V. A. Ivanov, "Way of increase in efficiency of cycle gas turbine units", (in Russian), in *Vestnik SGAU*, no. 3 (19), pp. 102-108, 2009.]
2. **Иванов В. А.** Выбор оптимальной степени повышения давления и принципа проектирования ГТУ сложного цикла // Изв. Рэн. Энергетика. 2016. № 1. С. 106–114. [V. A. Ivanov, "Choice of optimum degree of increase pressure and principle of design of gas turbine of complex cycle", (in Russian), in *Izv. Rэн. Energetika*, no. 1, pp. 106-114, 2016.]
3. **Андрющенко А. И.** Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок. М.: Высшая школа, 1985. 320 с. [A. I. Andryushchenko, *Fundamentals of thermodynamics of cycles of heat power plants*, (in Russian). Moscow: Vysshaya shkola, 1985.]
4. **Теория**, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / В. И. Бакулев [и др.]. М.: МАИ, 2003. 682 с. [V. I. Bakulev, et al., *Theory, calculation and design of aircraft engines and power plants*, (in Russian). Moscow: MAI, 2003.]

ОБ АВТОРЕ

ИВАНОВ Вадим Александрович, инж.-констр. 1 кат. АО «ОДК-Авиадвигатель». Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (ППИ, 1967). Канд. техн. наук. по тепл. двиг. (КГТУ, 1996). Иссл. сложных циклов ГТУ.

IVANOV, Vadim Aleksandrovich, 1st class design engineer in "Aviadvigatel" Public Corporation. Dipl. mechanical engineer for aircraft engine (PPI, 1967). Cand. of Tech. Sci. (KSTU, 1996).

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 26, no. 2 (96), pp. 53-59, 2022. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).