

УДК 629.064.5

## **Анализ возможных путей кратковременного форсирования ГТД на примере вспомогательного газотурбинного энергоагрегата**

Троицкий Н. И.<sup>1,\*</sup>, Хакимов Х. Х.<sup>1</sup>

[\\*Khayyom9292@gmail.com](mailto:Khayyom9292@gmail.com)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Рассматривается кратковременное форсирование ГТД по мощности на примере вспомогательного газотурбинного энергоагрегата тремя различными методами: впрыском воды перед компрессором, кратковременным повышением температуры после камеры сгорания и подачей дополнительного сжатого воздуха в камеру сгорания из резервных баллонов. Перечислены основные проблемы и некоторые пути их решения при реализации всех перечисленных методов кратковременного форсирования ГТД. По результатам проведенных расчетов показано, что при впрыске воды в количестве 1 % от общего расхода воздуха увеличение мощности составляет 17 %. При кратковременном увеличении температуры после камеры сгорания с 1270 К до 1350 К увеличение мощности составило 11,2 %. При подаче дополнительного сжатого воздуха из резервных баллонов в камеру сгорания в количестве 15 % от расхода воздуха в компрессоре можно увеличить мощность на 27 %. Возможности указанных способов кратковременного форсирования ограничены прочностью конструкции двигателя и характеристиками электрогенератора.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, форсирование, вспомогательный энергоагрегат, впрыск воды, термобарьерные покрытия

---

### **Введение**

В настоящее время одним из важных требований к авиационным, судовым и транспортным ГТД является форсирование двигателя по мощности в особых условиях движения. Существуют различные методы кратковременного форсирования (КФ) газотурбинных двигателей: кратковременное увеличение частоты вращения ротора, кратковременное увеличение температуры газа перед турбиной при максимальной частоте вращения (для одновальных ГТД), впрыск испаряющейся жидкости в компрессор или в камеру сгорания, дополнительное сжигание топлива за турбиной (в двухвальных двигателях)[1]. Все методы имеют свои достоинства и недостатки.

В малоразмерных ГТД КФ можно реализовать путём дополнительной подачи сжатого воздуха из резервных баллонов, имеющихся на борту транспортного средства. В данной работе рассмотрим возможность КФ вспомогательного газотурбинного энергоагрегата, работающего в составе транспортной силовой установки следующими методами: впрыск воды на входе в компрессор, кратковременное увеличение температуры газа и дополнительная подача сжатого воздуха из резервных баллонов.

Рассматриваемый вспомогательный энергоагрегат предназначен для обеспечения бортовой сети транспортных средств электроэнергией. Он также обеспечивает работу различных систем транспортного средства при выключенном основном двигателе на стояночном режиме, что позволяет более рационально расходовать топливо и увеличить запас хода транспортного средства[2]. В состав вспомогательного энергоагрегата входят одновалный ГТД (рис. 1), редуктор и генератор постоянного тока. Газотурбинный двигатель выполнен по простейшей схеме без регенератора, состоит из одноступенчатого центробежного компрессора и одноступенчатой турбины. Компрессор имеет степень повышения давления  $\pi_k = 3,2$ ; расход воздуха через компрессор  $G_b = 0,328 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ ; частота вращения ротора  $n = 96000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ ; температура газа перед турбиной  $T_t^* = 1270 \text{ К}$ ; электрическая мощность энергоагрегата  $N_e = 50 \text{ кВт}$ .

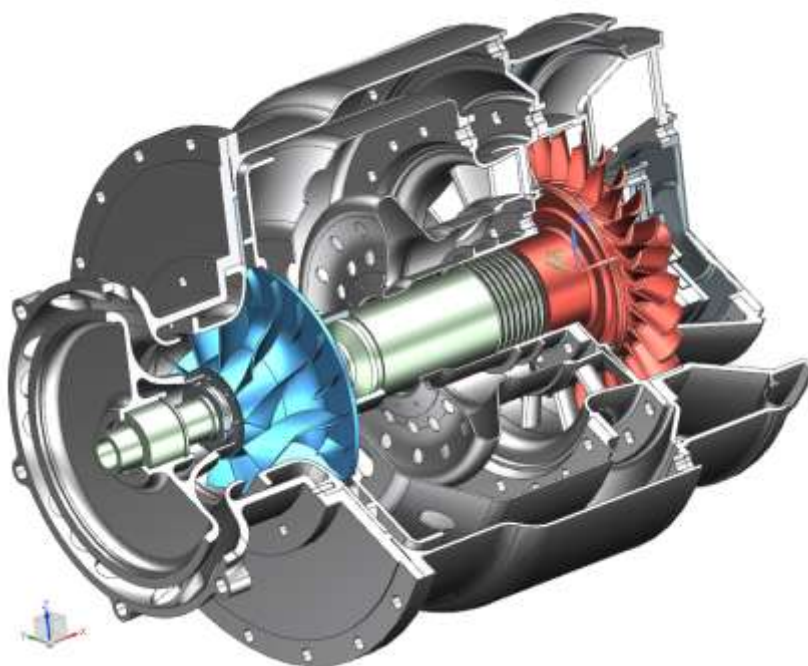


Рис. 1. Модель ГТД.

### Впрыск воды на входе в компрессор

В работе [3] приведены данные, согласно которым в установке ГТК-10 одновременный впрыск оптимального количества воды перед компрессором, в 3 и 7 ступени ком-

прессора увеличивает КПД установки на 3,2 %, мощность — на 16,8 %. Общее количество впрыскиваемой воды при этом составляет 1,2 % от расхода воздуха.

Вода впрыскивается на входе в компрессор через массив форсунок установленных во входном коллекторе. На входе образуется туман. Температура впрыскиваемой воды равна стандартной температуре. Размеры капель воды обычно составляют 5..60 мкм в диаметре. Влияние дисперсности капель, скорости впрыска и других параметров на процесс сжатия рассмотрено в работе [4].

Теплота, которая отнимается каплями воды от потока воздуха, состоит из трёх составляющих:

Первая – теплота, затрачиваемая на нагрев капель воды до температуры кипения:

$$Q_{\text{нагрева воды}} = c_{p \text{ воды}} \cdot \delta_{\text{воды}} \cdot (T_{\text{кип}} - T_0),$$

где  $c_{p \text{ воды}}$  – удельная теплоемкость воды,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ;  $\delta_{\text{воды}}$  – относительный расход впрыскиваемой воды, %;  $T_{\text{кип}}$  – температура кипения воды, К;  $T_0$  – температура впрыскиваемой воды на входе в компрессор, К.

Вторая – теплота парообразования:

$$Q_{\text{парообразования}} = \delta_{\text{воды}} \cdot q_{\text{воды}},$$

где  $q_{\text{воды}}$  – удельная теплота парообразования воды ( $q_{\text{воды}} = 2260 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ ).

Третья – теплота, затрачиваемая на нагрев пара до текущей температуры воздуха в компрессоре (условно считаем, что подогрев закончится на выходе из компрессора).

$$Q_{\text{нагрева пара}} = c_{p \text{ пара}} \cdot \delta_{\text{воды}} \cdot (T_{\text{к}} - T_{\text{кип}}),$$

где  $c_{p \text{ пара}}$  – удельная теплоемкость пара воды,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ;  $T_{\text{к}}$  – температура за компрессором, К.

В итоге, суммарная теплота, отнимаемая у потока воздуха равна:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\text{нагрева воды}} + Q_{\text{парообразования}} + Q_{\text{нагрева пара}} = c_{p \text{ возд}} \cdot (T_{\text{к}_0} - T_{\text{к}}),$$

где  $c_{p \text{ возд}}$  – удельная теплоемкость воздуха,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ ;  $T_{\text{к}_0}$  – температура за компрессором без впрыска воды, К.

Численные расчёты цикла ГТД были проведены по методике [5]. Вследствие того, что при впрыске воды на вход в компрессор у потока воздуха отнимается тепло, снижается температура воздуха. Снижение температуры сжатого воздуха с одной стороны даёт положительный результат, т.к. на сжатие более холодного воздуха затрачивается меньше работы, чем на сжатие воздуха с большей температурой, увеличивается удельная работа цикла [6]. Но с другой стороны, более низкая температура на входе в камеру сгорания потребует большего количества топлива для нагрева воздуха для сохранения заданной температуры газа на входе в турбину. Зависимость расхода топлива от относительного расхода впрыскиваемой воды (по отношению к расходу воздуха на входе в компрессор) показана на Рис. 2.

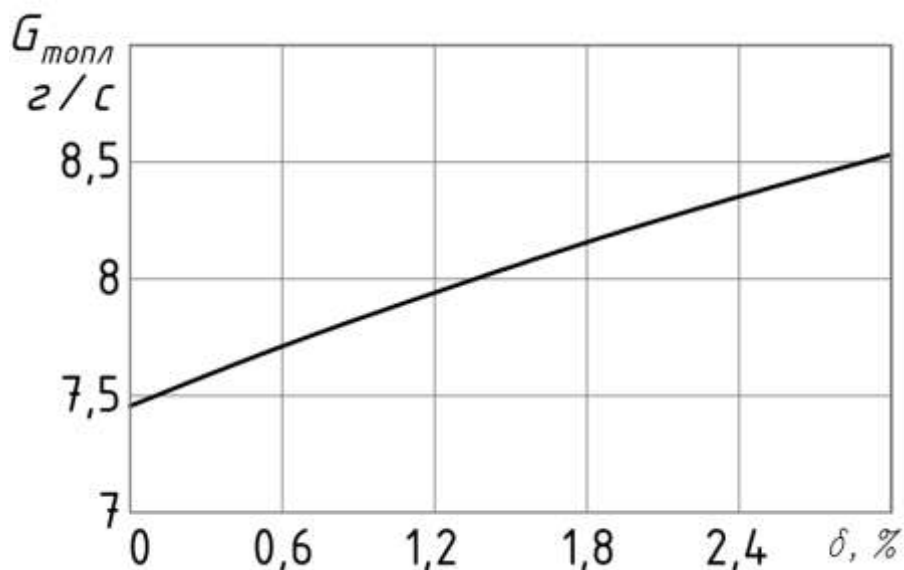


Рис. 2. Изменение расхода топлива от относительного расхода впрыскиваемой воды

Изменения температуры за компрессором и мощности в зависимости от относительного расхода впрыскиваемой воды показаны на Рис. 3.

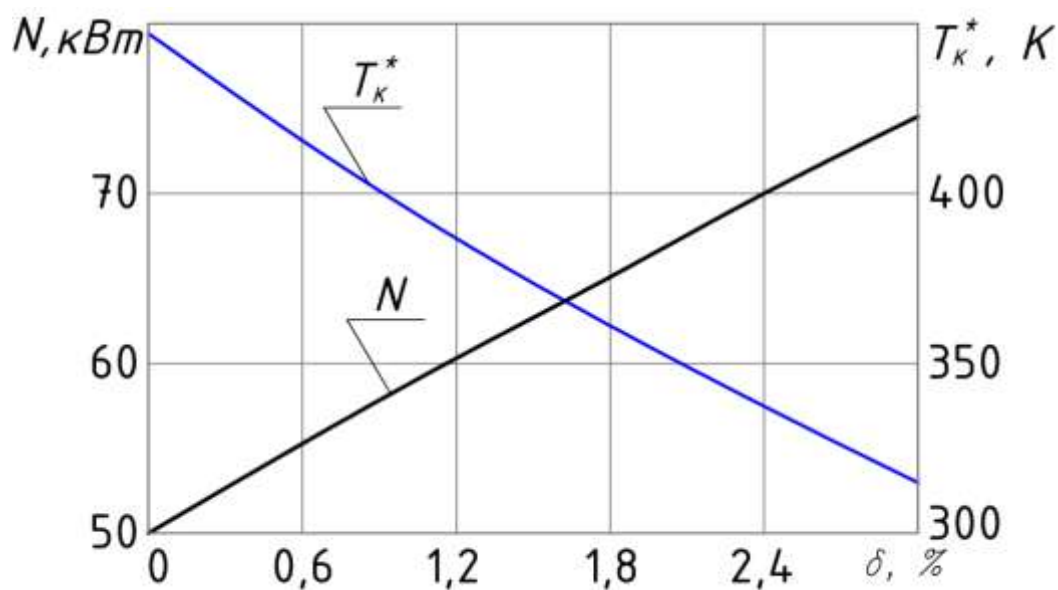


Рис. 3. Зависимость мощности и температуры за компрессором от относительного расхода впрыскиваемой воды

При впрыске воды в компрессор рассматриваемой ВСУ в количестве 1 % от общего расхода воздуха на входе в компрессор, электрическая мощность возрастает с 50 кВт до 58,5 кВт (на 17 %). С дальнейшим увеличением количества впрыскиваемой воды еще больше уменьшается температура за компрессором и увеличивается мощность, но это ог-

раничено тем, что впрыскиваемая вода может не испариться до выхода из компрессора. Обычно количество впрыскиваемой воды на входе составляет 1-2 %.

Впрыск воды оказывает положительное влияние на работу ГТД: помимо увеличения мощности, лопатки компрессора промываются от отложений, и снижается уровень выброса окислов азота [4]. А в некоторых случаях наблюдается и повышение КПД установки [3]. Также впрыск воды в компрессор ГТД является эффективным методом для восстановления мощности двигателей, работающих в условиях повышенной температуры окружающей среды.

Эффективность впрыска воды в компрессор газотурбинных двигателей подтверждена в работах ряда отечественных [3] и иностранных авторов [4].

Следует учесть, что при реализации данного метода можно столкнуться с рядом трудностей: увеличение массогабаритных характеристик двигателя, необходимость в дополнительных насосах и приводах для осуществления впрыска и фильтров для очистки воды, коррозия элементов проточной части компрессора. Также наличие воды становится причиной появления дополнительных потерь энергии потока воздуха, связанных с разгоном капель и перемещением пленки на поверхностях лопаток и корпуса, и торможение лопаток рабочего колеса ударяющимся о них каплями [3].

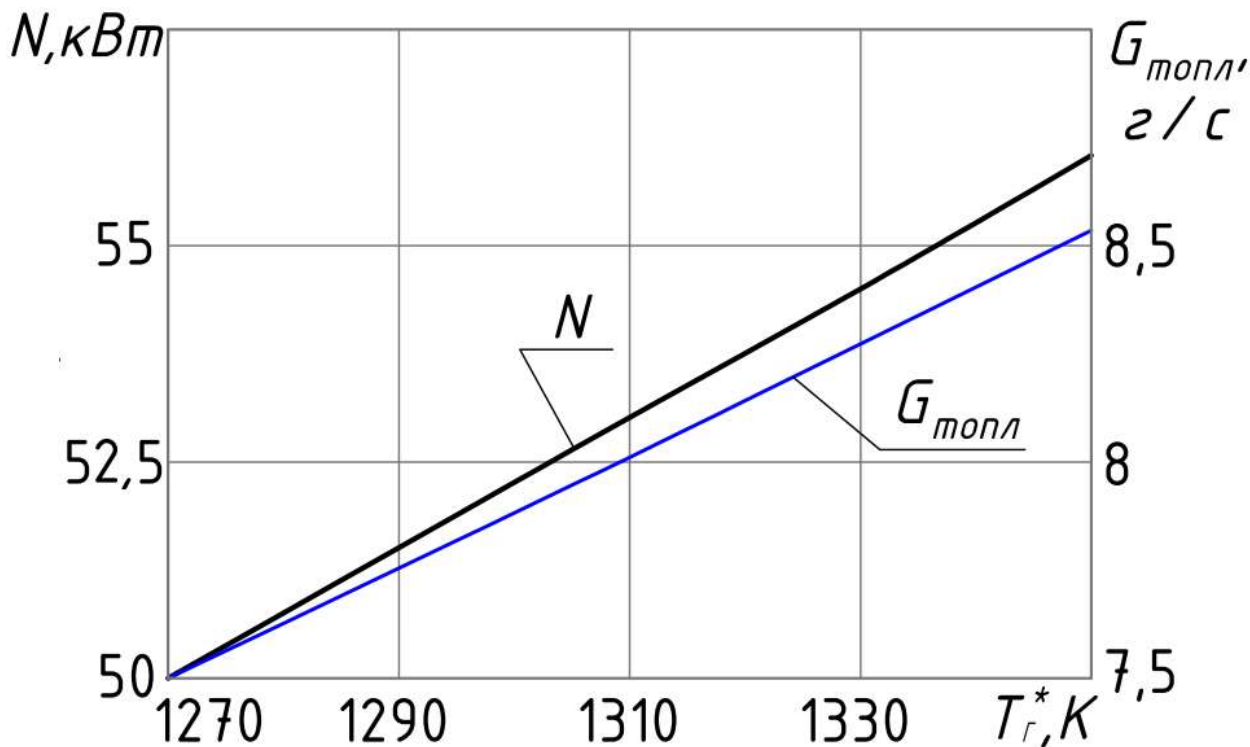
### **Кратковременное повышение температуры газа перед турбиной**

Этот метод реализуется увеличением подачи топлива в камеру сгорания. Возможности увеличения мощности ГТД при таком методе форсирования ограничены допустимыми значениями температуры газа перед турбиной и величиной радиальных зазоров [7]. С увеличением температуры уменьшается предел длительной прочности материалов лопаток, увеличивается газовая коррозия [8]. Также данный метод связан с опасностью перегрева и термического разрушения лопаток и других деталей двигателя. Поэтому данный метод используется крайне редко и только при кратковременном форсировании.

Такое кратковременное увеличение температуры возможно из-за тепловой инерционности лопаток турбины. При увеличении температуры газа температура лопаток увеличивается не сразу. Постоянная времени нагрева обычно составляет 40..60 с. в зависимости от размеров и материала лопаток и наличия термобарьерных покрытий. В связи с этим, КФ может быть допущено на 10..20 с., исходя из прочности рабочих лопаток турбины.

Для предотвращения перегревов и образования нагаров на поверхности лопаток наносятся термобарьерные покрытия (ТБП) из наименее теплопроводных материалов. Наиболее распространены покрытия состоящие из  $ZrO_2 + MgO$ ,  $ZrO_2 + Y_2O_3$  [9]. Недостатками таких покрытий являются низкая ударная вязкость и уменьшение размеров при затвердевании из-за разности коэффициента теплового расширения материалов лопаток и ТБП. Часто между основным металлом лопатки и ТБП наносят связующие материалы ( $Ni-Cr-Al-Y$ ) или их армируют с помощью платиновой сетки, закрепляемой на поверхности лопаток контактной сваркой.

В результате проведенных расчётов были получены следующие данные: для увеличения температуры газа после КС на  $80^\circ$  (до 1350 К) необходимо повысить расход топлива на 11 % больше, чем для температуры в номинальном режиме (при  $T_g^* = 1270$  К). Изменения относительной мощности и расхода топлива в зависимости от температуры газа перед турбиной показаны на Рис. 4.



**Рисунок 4.** Зависимость изменения относительной мощности и относительного расхода топлива от температуры газа

Из Рис. 4. видим, что при увеличении температуры газа до 1350 К электрическая мощность двигателя возрастает на 11,2 %, и увеличивается расход топлива на 11 %.

Данный метод, как и впрыск воды в компрессор, является довольно эффективным при кратковременном увеличении мощности ГТД. При увеличении температуры газа перед турбиной увеличивается работа турбины, а так как работа компрессора остается постоянной (при постоянной частоте вращения ротора), то работа цикла возрастает, что приведет к увеличению мощности установки в целом. Но этот метод более опасен, т.к. повышение температуры газа приводит к уменьшению прочности лопаток, а также к возникновению перегревов входных кромок лопаток и других деталей двигателя.

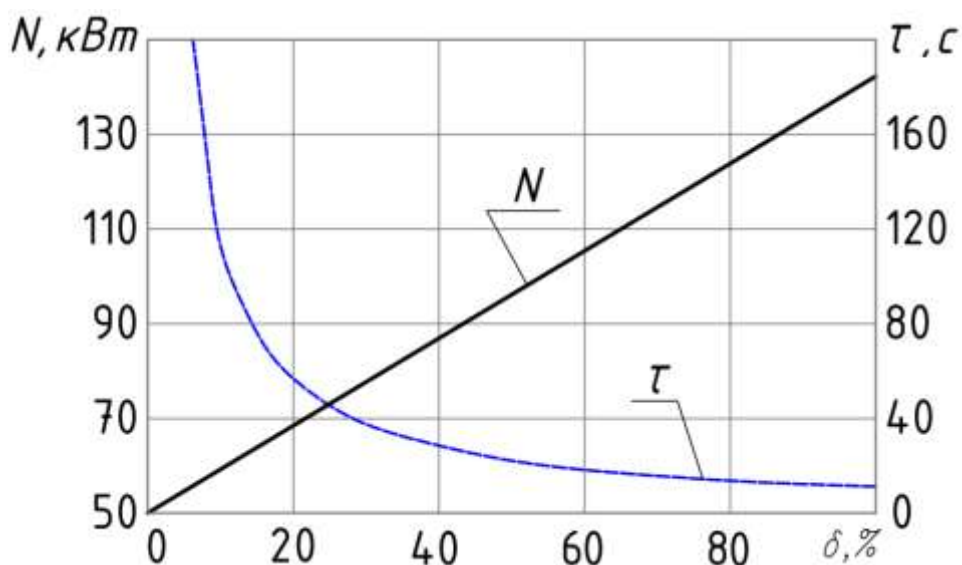
### Подача сжатого воздуха из резервных баллонов

Данный метод может применяться только для малоразмерных и вспомогательных ГТУ, работающих в составе силовой установки, имеющей баллоны сжатого воздуха на транспортных средствах. Рассмотрим форсирование вспомогательной силовой установки,

установленной в военно-гусеничной машине, в которой имеются два баллона сжатого воздуха по 10 литров с давлением до 150 атм. Воздух в эти баллоны накачивается от специального воздушного компрессора АК-150. При полной зарядке в баллонах масса воздуха составляет 3,6 кг.

При подаче дополнительного сжатого воздуха в КС (при  $T_r^* = const$ ) возрастает работа турбины, а так как работа компрессора не меняется, то увеличивается работа цикла. Следовательно, повысится и мощность двигателя. Но при этом потребуются повысить расход топлива в камере сгорания т.к. подаваемый дополнительный сжатый воздух, который хранится в резервных баллонах, имеет температуру равную температуре окружающей среды.

В результате проведенных расчётов, были получены следующие данные: мощность ГТД возрастает с увеличением относительного расхода дополнительного воздуха, что показано на Рис. 5. При относительном расходе воздуха равным 20 % по отношению к расходу воздуха в компрессоре, увеличение мощности составляет 36 % и может быть осуществлен в течении 56 с.



**Рис.5.** Изменение мощности и времени форсирования при подаче сжатого воздуха из баллонов

Форсирование данным методом также является одним из наиболее эффективных путей. Но его реализация требует установки дополнительных баллонов со сжатым воздухом, что увеличивает массогабаритные характеристики силовой установки, также возникает необходимость дозаправки этих баллонов после их срабатывания. Из-за ограничения дополнительного воздуха в баллонах этот метод применим только для кратковременного форсирования малоразмерных и вспомогательных ГТД.

## Выводы

1. Наиболее рациональным методом КФ является впрыск воды на входе в компрессор. При впрыске воды в количестве 1 % от общего расхода воздуха получено увеличение мощности на 17 %. Следует упомянуть о возникновении необходимости в дополнительных насосах и приводах для осуществления впрыска и фильтров для очистки воды, что приводит к увеличению массогабаритных характеристик силовой установки.

2. При кратковременном увеличении температуры после КС с 1270 К до 1350 К увеличение мощности составило 11,2 %. Этот метод наиболее простой и не требует дополнительных приспособлений, однако он ограничен по времени в зависимости от постоянной времени нагрева лопаток, которая обычно составляет 40..60 с. В связи с этим, КФ таким способом может быть реализовано в течение 10..20 с. в зависимости от прочности рабочих лопаток турбины. Для увеличения данного промежутка на поверхности лопаток наносят термобарьерные покрытия.

3. При наличии баллонов сжатого воздуха на борту транспортного средства может быть реализовано КФ вспомогательного энергоагрегата по мощности на 27 % при относительном расходе дополнительного воздуха 0,15 по отношению к расходу воздуха в компрессоре. Также дополнительные баллоны приводят к увеличению массогабаритных характеристик силовой установки транспортного средства.

4. Пределы данных методов КФ определяются прочностью конструкции и характеристиками генератора.

## Список литературы

1. Елисеев Ю.С., Манушин Э.А., Михальцев В.Е., и др. Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок. Учебник для вузов 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2000. 640 с.
2. Троицкий Н.И. Применение накопителей энергии — радикальный способ улучшения топливной экономичности наземных машин с газотурбинным двигателем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. №3. С. 110-118.
3. Беркович А.Л., Полищук В.Г., Назаренко А.В. Форсирование стационарных газотурбинных установок оптимальным впрыском воды в компрессор // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2015. № 2 (219). С. 33-40.
4. Chaker Mustapha, Meher-Homji Cyrus B., Mee Thomas (III). Inlet fogging of gas turbine engines // Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power. 2004. Vol. 126, №3. P. 545–580.
5. Михальцев В.Е., Моляков В.Д. Расчёт параметров цикла при проектировании газотурбинных двигателей и комбинированных установок // Учебное пособие, под ред. И.Г. Суровцева. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 58 с.
6. Тумашев Р.З., Моляков В.Д., Лаврентьев Ю.Л. Повышение эффективности компрессорных станций магистральных газопроводов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 1. С. 68-79.

7. Моляков В.Д., Куникеев Б.А. Особенности проектирования эффективных турбин с учетом влияния радиального зазора // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 9 (654). С. 9-18. DOI: [10.18698/0536-1044-2014-9-9-18](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2014-9-9-18)
8. Артеменко Н. И., Симонов В. Н., Трусов Б.Г. Термодинамический анализ нанесения защитных диффузионных покрытий с танталовым подслоем на лопатки ГТД из жаропрочных никелевых сплавов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. №7. С. 337-344. DOI: [10.7463/0713.0583284](https://doi.org/10.7463/0713.0583284)
9. Bob Rapp. Coatings improve efficiency // Materials Today. 2006. vol. 9, no. 7–8. Pp. 6. DOI: [10.1016/S1369-7021\(06\)71555-3](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(06)71555-3)

## **Analysing the Possible Ways for Short-Term Forcing Gas Turbine Engines in Auxiliary Power Unit**

**N.I. Trotskii<sup>1,\*</sup>, Kh.Kh. Khakimov<sup>1</sup>**

[\\*Khayyom9292@gmail.com](mailto:Khayyom9292@gmail.com)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** gas-turbine-engine, forcing, auxiliary power unit, water injection, thermal barrier coating

---

Using a gas turbine energy unit as an example, the article discusses possible ways for forcing the short-term gas turbine engines (GTE). The introduction explains the need for forcing the air transport and marine GTE in specific driving conditions and offers the main methods. Then it analyzes the three main short-term forcing methods according to GTE power, namely: pre-compressor water injection, a short-term rise in temperature after the combustion chamber, and feeding an additional compressed air into combustion chamber from the reserve cylinders.

The analysis of the water injection method to force a GTE presents the main provisions and calculation results of the cycle, as a function of engine power on the amount of water injected into compressor inlet. It is shown that with water injection into compressor inlet in an amount of 1% of the total airflow there is a 17% power increase in the compressor. It also lists the main implementation problems of this method and makes a comparison with the results of other studies on the water injection into compressor.

Next, the article concerns the GTE short-term forcing method through the pre-turbine short-term increase in the gas temperature. The article presents the calculation results of the cycle as a function of the power and the fuel-flow rate on the gas temperature at the turbine inlet. It is shown that with increasing temperature by 80 degrees the engine power increases by 11.2% and requires 11% more fuel. In the analysis of this method arises an issue of thermal barrier coating on the blade surface. The article discusses the most common types of coatings and their main shortcomings. It lists the main challenges and some ways of their solving when using this method to implement the short-term forcing.

The last method under consideration is GTE short-term forcing by feeding the compressed air into the combustion chamber from the additional reserve cylinders. It should be noted that this method is applied only to small-sized and auxiliary gas turbines, operating as part of gas turbine power plants in vehicles, which comprise additional compressed air cylinders. Here are calculation results as a function of the engine power and forcing time on the amount of additional compressed air fed into the combustion chamber. The article shows that in feeding the additional

compressed air in the amount of 15% of the airflow the engine power in the compressor is increased by 27%. It also describes the main implementation difficulties of this method.

In conclusion, the article presents data on the considered methods for short-term forcing the GTE and shows the main difficulties in their implementation. It also comes to conclusion that the electro-generator design strength and characteristics restrict the limits of these short-term forcing methods.

## References

1. Eliseev Yu.S., Manushin E.A., Mikhal'tsev V.E., et al. *Teoriya i proektirovanie gazoturbinnnykh i kombinirovannykh ustanovok* [Theory and designing of gas-turbine and combined plants]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 640 p. (In Russian).
2. Troitskiy N.I. Using energy accumulators is the radical way for improving efficiency of ground-based vehicles with gas-turbine Engines. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Ser. Mechanical Engineering*, 2014, no. 3, pp. 110-118. (In Russian).
3. Berkovich A.L., Polishchuk V.G., Nazarenko A.V. Boosting gas turbine power plants through optimal water injection into compressor. *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2015, no. 2 (219), pp. 33-40. (In Russian).
4. Chaker Mustapha, Meher-Homji Cyrus B., Mee Thomas (III). Inlet fogging of gas turbine engines. *Trans. ASME. J. Eng. Gas Turbines and Power*, 2004, vol. 126, no. 3, pp. 545–580.
5. Mikhal'tsev V.E., Molyakov V.D. *Raschet parametrov tsikla pri proektirovanii gazoturbinnnykh dvigateley i kombinirovannykh ustanovok* [Cycle parameters calculation in designing of gas turbine engines and combined plants]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2014. 58 p. (In Russian).
6. Tumashev R.Z., Molyakov V.D., Lavrent'yev Yu.L. Increasing the efficiency of compressor stations at main gas pipelines. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Ser. Mechanical Engineering*, 2014, no. 1, pp. 68-79. (In Russian).
7. Molyakov V.D., Kunikeev B.A. Designing efficient turbines taking into account radial clearance. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie*, 2014, no. 9 (654), pp. 9-18. (In Russian). DOI: [10.18698/0536-1044-2014-9-9-18](https://doi.org/10.18698/0536-1044-2014-9-9-18)
8. Artemenko N. I., Simonov V. N., Trusov B.G. Thermodynamic analysis of covering blades of gas-turbine engines made of heatproof nickel alloys with protection diffusion coatings with tantalum undercoat. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 7, pp. 337-344. (In Russian). DOI: [10.7463/0713.0583284](https://doi.org/10.7463/0713.0583284)
9. Bob Rapp. Coatings improve efficiency. *Materials Today*, 2006, vol. 9, no. 7–8, pp. 6. DOI: [10.1016/S1369-7021\(06\)71555-3](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(06)71555-3)