

## ПЛАЗМЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ В ТУРБИНЕ ГТД

А. А. НИКИТИН<sup>1</sup>, Д. А. АХМЕДЗЯНОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>nikitin-aleksandr1999@yandex.ru, <sup>2</sup>akhmedzyanov@yandex.ru

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

**Аннотация.** В данной статье рассматривается перспективный способ регулирования радиального зазора в турбине газотурбинного двигателя. Таким способом выступает плазменное регулирование радиального зазора за счет диэлектрического барьерного разряда (ДБР). В статье описана конструкция плазменного актуатора, а также принцип работы. Рассмотрены и проанализированы различные эксперименты (при непрерывном и импульсном режимах работы плазменного актуатора), проводимые зарубежными учеными для оценки эффективности регулирования радиального зазора.

**Ключевые слова:** плазменное регулирование, радиальный зазор, диэлектрический барьерный разряд (ДБР), турбина газотурбинного двигателя (ГТД), плазменный актуатор.

### ВВЕДЕНИЕ

В современных газотурбинных двигателях на параметры эффективности узлов компрессора и турбины в наибольшей степени оказывают влияние радиальные зазоры (РЗ). Величина РЗ при работающем двигателе влияет на топливную эффективность, ресурс, а также экологические параметры. При протекании воздуха или газа через радиальный зазор полезная работа не совершается, поэтому при создании двигателя стремятся максимально возможно уменьшить величину радиального зазора. Точность изготовления, обороты двигателя, износ двигателя, положение самолета в полете, величина и скорость температурной деформации деталей узлов двигателя – все эти факторы оказывают влияние на величину радиального зазора.

Увеличение удельного радиального зазора (отношение величины радиального зазора к высоте лопатки) на 1 % приводит к потерям КПД турбины или компрессора примерно на 1–2 % (иногда и к большим потерям) [1]. Для малоразмерных ГТД, а также газогенераторов проблема радиального зазора является особенно актуальной.

Для обеспечения максимальной эффективности узлов компрессора и турбины газотурбинного двигателя применяют системы управления радиальным зазором (СУРЗ) (

Рис. 1) [1]. Далее на примере турбины ГТД будем рассматривать современные СУРЗ.

Наиболее часто применяют пассивный тип системы управления радиальными зазорами. Применение пассивного типа СУРЗ обеспечивает необходимую величину РЗ за счет самой конструкции узла двигателя, но при этом отсутствует возможность изменять величину РЗ в течение работы двигателя. Различают тепловой и газовый методы СУРЗ пассивного типа [1].

Для осуществления дополнительного регулирования радиального зазора в период работы двигателя применяются СУРЗ активного типа. Наиболее распространённым методом системы управления радиальным зазором активного типа является тепловой метод. Данный метод подразумевает регулирование РЗ за счет охлаждения (нагрева) деталей СУРЗ. Применяются программируемые системы, где величина охлаждающего (нагревающего) воздуха зависит от ре-

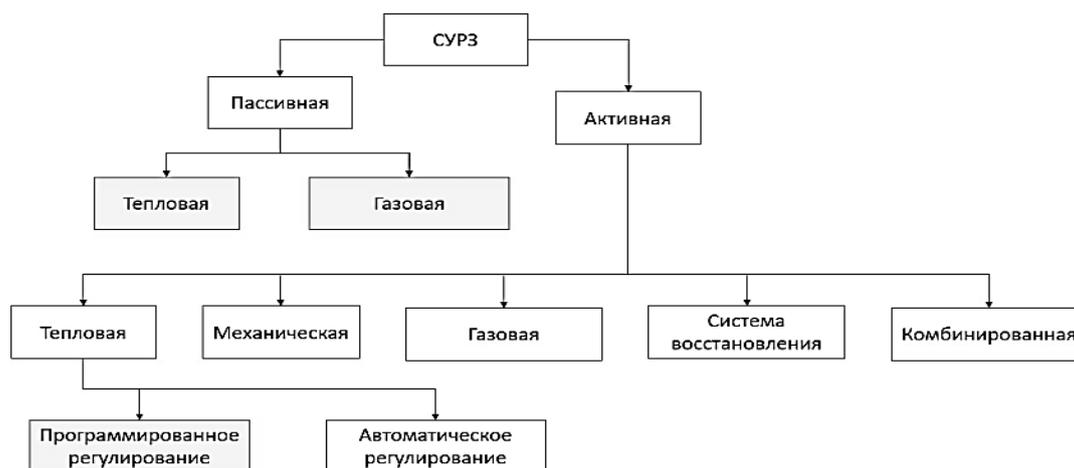


Рис. 1. Типы систем управления радиальным зазором

жима работы двигателя. Основным недостатком теплового метода СУРЗ активного типа является низкая скорость реакции на изменение режима охлаждения РЗ. Также существуют другие (менее распространённые) методы СУРЗ активного типа: механический, газовый [1].

Наиболее интересным и перспективным методом регулирования радиального зазора выступает плазменное регулирование, а именно – применение плазменного актуатора с диэлектрическим барьерным разрядом (ДБР). Данный метод обладает множеством преимуществ по сравнению с современными методами регулирования радиального зазора. В дальнейших разделах плазменное регулирование радиального зазора рассмотрено более подробно.

#### ПЛАЗМЕННЫЙ АКТУАТОР С ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ БАРЬЕРНЫМ РАЗРЯДОМ

Плазменный актуатор – это исполнительный механизм, предназначенный для управления аэродинамическим потоком. Управление осуществляется за счет подвода энергии в поток путем плазменных образований [2–3]. Из-за подвода энергии происходит нагрев среды потока и локальное увеличение скорости потока с образованием поперечного или продольного вихря, также происходит индуцирование потока вдоль поверхности корпуса. За счет расположения плазменных актуаторов в корпусе турбины (или на торце лопатки), изменения количества актуаторов, а также изменения режима работы осуществляется управление потоком.

Использование плазменных актуаторов (ПА) для управления потоком обладает рядом преимуществ по сравнению с тепловым, механическим и газовым методами СУРЗ активного типа [3]. ПА полностью электронные, просты в своей конструкции, не имеют механических и подвижных частей, обладают низкой инерционностью, есть возможность интеграции в поверхность, расположения на очень тонких поверхностях.

Плазменные актуаторы показали свою эффективность в различных приложениях по управлению потоком, в таких как увеличение подъемной силы на элементах крыла, управление отрывом потока с передней кромки профиля, управление отрывом потока на лопатках турбины низкого давления [3].

Конструктивно плазменный актуатор с диэлектрическим барьерным разрядом состоит из двух ассиметрично расположенных электродов, которые разделены диэлектриком (Рис. 2) [4]. Один электрод является открытым, и он контактирует с воздухом (газом), а другой – закрытым, он полностью погружен в диэлектрик. Также для работы актуатора необходим высоковольтный источник питания переменного тока, который должен быть соединен с двумя электродами. Также после источника переменного тока может устанавливаться высоковольтный усилитель мощности.

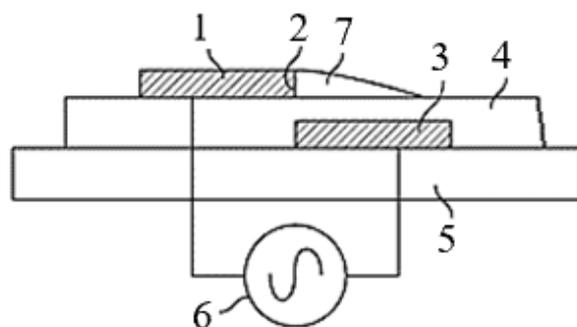


Рис. 2. Плазменный актуатор с диэлектрическим барьерным разрядом:

1 – открытый электрод; 2 – торец открытого электрода; 3 – закрытый электрод; 4 – диэлектрик; 5 – подложка; 6 – высоковольтный источник питания переменного тока; 7 – плазма

Плазменный актуатор может работать в двух режимах (способы возбуждения): непрерывном и импульсном (пакетном) [4–5]. Изменения напряжения от времени для двух режимов работы приведены на Рис. 3.

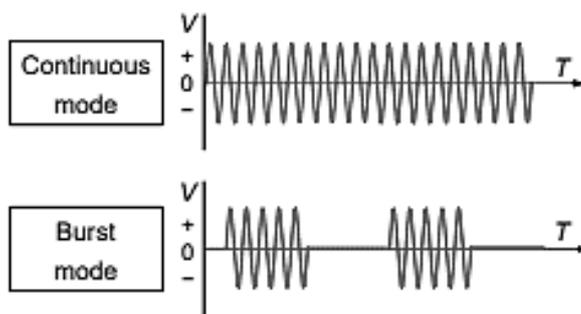


Рис. 3. Непрерывный и импульсный режимы работы плазменного актуатора

Импульсный режим работы ПА при определённых обстоятельствах может иметь преимущества по сравнению с непрерывным режимом. Как видно из Рис. 3, при импульсном режиме работы актуатор срабатывает в определённые периоды времени, и следовательно сигнал, посылаемый на актуатор, имеет характеристическую частоту  $f = 1/T$  [4], которая будет намного ниже, чем у синусоиды при непрерывном режиме работы актуатора. Полученная характеристическая частота должна быть сопоставима с частотой конкретного потока, которым требуется управлять. Также может быть определен соответствующий рабочий цикл для импульсного режима работы плазменного актуатора.

Также хочется отметить, что существуют три основные электродные конфигурации, используемые для организации ДБР: объемная, поверхностная и компланарная (Рис. 4) [6].

В объемной конфигурации разрядный промежуток жестко ограничивается расположением электродов, разрядный путь определяется концентрацией затравочных электронов и искажениями локального электрического поля, вызванными наработкой объемного заряда и зарядкой поверхностного диэлектрического барьера [6].

В поверхностной конфигурации разрядный промежуток не ограничивается геометрией электродной системы. В данной конфигурации разряд распространяется вдоль поверхности барьера [6]. На Рис. 2 как раз представлен плазменный актуатор с ДБР в поверхностной конфигурации.

Компланарная конфигурация является модификацией поверхностной конфигурации путем заключения открытого электрода в диэлектрик. Благодаря разнесению электродов на некоторое расстояние происходит незначительное увеличение порогового напряжения зажигания разряда, также разряд становится симметричным относительно полярности электродов [6].

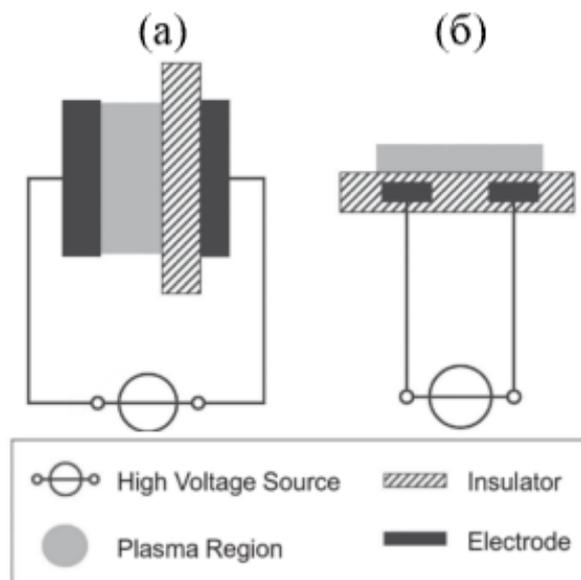


Рис. 4. Конфигурации для инициирования барьерного разряда:  
а – объемная конфигурация;  
б – компланарная конфигурация

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВТОРИЧНЫХ ПОТОКОВ В КАСКАДЕ ТУРБИНЫ ПУТЕМ ПЛАЗМЕННОГО АКТУАТОРА

Далее будут рассмотрены эксперименты зарубежных ученых с применением плазменных актуаторов при разных режимах работы для регулирования радиального зазора.

Согласно информации, приведенной в статье [5], были произведены различные исследования с плазменными актуаторами при непрерывном и импульсном режимах работы. Например, при экспериментальном исследовании влияния импульсного режима работы ПА на управление разделением потока со стороны спинки в каскаде турбины низкого давления выяснили, что актуатор в импульсном режиме на 10 % мощности обеспечивает ту же эффективность уменьшения разделения потока, что и актуатор в непрерывном режиме работы при 100 % мощности. Результаты данного исследования показывают, что актуатор в импульсном режиме работы обладает большей энергетической эффективностью [5].

Рассмотрим другое исследование, также приведенное в статье [5]. Проведен эксперимент с применением плазменного актуатора с ДБР в импульсном режиме работы для уменьшения проходного вихря, создаваемого в каскаде турбины. Оказалось, что плазменный актуатор в импульсном режиме работы эффективнее, чем в непрерывном с точки зрения потребления электроэнергии. Максимальный КПД составил 2,46, что примерно в 2,5 раза выше, чем КПД при работе актуатора в непрерывном режиме [5].

В статьях [7–8] рассматриваются варианты применения плазменных актуаторов на торце рабочей лопатки турбины в сочетании со «сквилером» (элемент пассивного регулирования радиального зазора). Результаты в статье [7] показали, что применение «плазменного сквилера» является эффективным методом управления потоком через радиальный зазор в плоской турбинной решетке. Потери, связанные с утечками в радиальном зазоре, могут быть уменьшены примерно на 8% при использовании импульсного режима работы плазменного актуатора.

Также, согласно исследованию, большую роль в управлении потоком в радиальном зазоре играет отношение толщины лопатки к зазору. При отношении 3,5 [7] наблюдаются значительные изменения в поведении потока в радиальном зазоре – эффективность регулирования уменьшается.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены различные методы регулирования радиального зазора в турбине ГТД. Также подробно описан метод плазменного регулирования радиального зазора за счет плазменного актуатора с диэлектрическим барьерным разрядом.

Основными преимуществами использования плазменного актуатора для управления вторичными потоками в каскаде турбины являются:

- высокая энергетическая эффективность в импульсном режиме работы плазменного актуатора (необходимо небольшое количество энергии для осуществления регулирования);
- достаточно простая конструкция;
- согласно исследованиям, описанным выше, плазменное регулирование достаточно эффективный метод управления вторичными течениями в турбине;
- высокая надежность за счет отсутствия механических и подвижных частей в конструкции актуатора;
- ПА обладают низкой инерционностью;
- вариативность конструкции, возможность установки электродов так, чтобы не загромождать проточную часть турбины;
- электроды и диэлектрик выполняются из материалов, устойчивых к высоким температурам.

Из недостатков плазменного метода регулирования радиального зазора хочется отметить:

- основная часть экспериментов проводилась для плоских решеток ступени турбины, данные результаты исследований могут отличаться от процессов, проходящих в осевой ступени турбины (на двигателе);
- малая изученность данного метода регулирования;
- отсутствие в свободном доступе методик моделирования работы плазменного актуатора;
- дороговизна и техническая сложность экспериментальных исследований.

Несмотря на вышеперечисленные недостатки данного метода регулирования радиального зазора, а также вторичных течений в ступени турбины, метод плазменного регулирования является перспективным (опираясь на преимущества) и, возможно, будет применяться в авиационных ГТД будущих поколений

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков М.А. Развитие системы управления радиальным зазором газотурбинного двигателя по направлениям повышения динамичности технических систем [Электронный ресурс]. URL: <https://metodolog.ru/node/2108> (дата обращения 09.03.2023).
2. Плазменные актуаторы и ударные вол-ны//Советский физик [Электронный ресурс]. [https://phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2014/06\(109\)-2014/20685/](https://phys.msu.ru/rus/about/sovphys/ISSUES-2014/06(109)-2014/20685/) (дата обращения 09.03.2023).
3. Редчиц Д.А. Математическое моделирование диэлектрического барьерного разряда при работе плазменного актуатора, XML-реализация // Вестник ХНТУ. 2011. № 3 (42). С. 359–365. [ D. A. Redchits, “Mathematical modeling of a dielectric barrier discharge during operation of a plasma actuator,” (in Ukraine), in Vestnik KNTU, no. 3 (42), pp. 359–365, 2011. ]
4. US20090065064A1 Compressor tip gap flow control using plasma actuators [Электронный ресурс]. <https://patents.google.com/patent/US20090065064A1/en> (дата обращения 09.03.2023).
5. Takayuki Matsunuma. Effects of Burst Ratio and Frequency on the Passage Vortex Reduction of a Linear Turbine Cascade Using a Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator [Электронный ресурс]. [https://www.researchgate.net/publication/362394064\\_Effects\\_of\\_Burst\\_Ratio\\_and\\_Frequency\\_on\\_the\\_Passage\\_Vortex\\_Reduction\\_of\\_a\\_Linear\\_Turbine\\_Cascade\\_Using\\_a\\_Dielectric\\_Barrier\\_Discharge\\_Plasma\\_Actuator](https://www.researchgate.net/publication/362394064_Effects_of_Burst_Ratio_and_Frequency_on_the_Passage_Vortex_Reduction_of_a_Linear_Turbine_Cascade_Using_a_Dielectric_Barrier_Discharge_Plasma_Actuator) (дата обращения 09.03.2023).
6. Селивонин И.В. Модификация электродов в ди-электрическом барьерном разряде и ее влияние на раз-ряд [Электронный ресурс]. [https://jiht.ru/study/bases/fpfe/disser\\_selivonin.pdf](https://jiht.ru/study/bases/fpfe/disser_selivonin.pdf) (дата обращения 09.03.2023).
7. Scott C. Morris and Thomas C. Corke Tip Clearance Control Using Plasma Actuators [Электронный ресурс]. [https://www.researchgate.net/publication/235149906\\_Tip\\_Clearance\\_Control\\_Using\\_Plasma\\_Actuators](https://www.researchgate.net/publication/235149906_Tip_Clearance_Control_Using_Plasma_Actuators) (дата обращения 09.03.2023).

8. Daniel K. Van Ness II, Thomas C. Corke, Scott C. Morris Turbine Tip Clearance Flow Control using Plasma Actuators [Электронный ресурс]. [https://www.researchgate.net/publication/239922403\\_Turbine\\_Tip\\_Clearance\\_Flow\\_Control\\_using\\_Plasma\\_Actuators](https://www.researchgate.net/publication/239922403_Turbine_Tip_Clearance_Flow_Control_using_Plasma_Actuators) (дата обращения 09.03.2023).

#### ОБ АВТОРАХ

**НИКИТИН Александр Александрович**, магистрант каф. АД. Дипл. инж. по специальности «Двигатели летательных аппаратов» (УГАТУ, 2022). Готовит дис. о регулировании радиального зазора в турбине высокого давления ТРДД.

**АХМЕДЗЯНОВ Дмитрий Альбертович**, проф. каф. авиац. двигателей, декан ФАДЭТ. Дипл. инж. по авиац. двигателям и энерг. установкам (УГАТУ, 1997). Д-р техн. наук по тепл., электроракетн. двигателям и энергоустановкам ЛА (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. раб. процессов в авиац. ГД, автоматизации испытаний.

#### METADATA

**Title:** Plasma regulation of radial clearances in the turbine of a GTE.

**Authors:** A. A. Nikitin<sup>1</sup>, D. A. Akhmedzyanov<sup>2</sup>

**Affiliation:** Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> nikitin-aleksandr1999@yandex.ru, <sup>2</sup> akhmedzyanov@yandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 2 (28), pp. 103-108, 2023. ISSN 2225-9309 (Print).

**Abstract:** This article discusses a promising method of regulating the radial clearance in the turbine of a gas turbine engine. This method is the plasma regulation of the radial gap due to the dielectric barrier discharge (DBD). The article describes the design of the plasma actuator, as well as the principle of operation. Various experiments (with continuous and burst modes of operation of a plasma actuator) conducted by foreign scientists to evaluate the effectiveness of radial clearance control are considered. The main advantages and disadvantages of plasma regulation of the radial gap are noted. Relevant conclusions have been drawn.

**Key words:** wind generator; market review; horizontal wind turbines; vertical wind turbines; composite materials; lamination; infusion; efficiency, payback.

#### About authors:

**NIKITIN, Alexander Alexandrovich**, Undergraduate, Dept. of Aircraft Engines. Dipl. engineer in the specialty " Aircraft engines" (USATU, 2022). Prepares dis. on the regulation of the radial clearance in the high-pressure turbine of a bypass turbofan engine.

**AKHMEDZYANOV, Dmitry Albertovich**, Prof., Dean of Aircraft Engines, Energy and Transportation Engineering. Dipl. engineer in aircraft engines design (USATU, 1997 ). Cand. of Tech. Sci. (USATU, 2000), Dr. of Tech. Sci. (USATU, 2007).