

УДК 621.3.08

**А. В. Исаков, Н. П. Степанушкин, канд. техн. наук В. П. Колесник,  
канд. техн. наук В. В. Колесник, А. О. Гарин**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ГАЗОРАЗРЯДНОЙ КАМЕРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИОННОЙ ПОЛИРОВКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

*Рассмотрена возможность повышения энергетического КПД источника ионов и равномерности распределения плотности ионов по сечению потока за счет оптимизации конфигурации магнитной системы газоразрядной камеры (ГРК) плазменно-ионного ускорителя и определения предпочтительной зоны ввода плазмообразующего газа. Проведено сравнение качественных и количественных характеристик магнитного поля, полученных экспериментальным и расчетным путем. Проведено исследование технологических возможностей устройства для ионной полировки поверхностей лопаток ГТУ.*

**Ключевые слова:** газоразрядная камера, ионная полировка, магнитная система, оптимизация, плазменно-ионный ускоритель.

### **Актуальность**

Одним из направлений повышения ресурса и надежности работы лопаток газотурбинных установок (ГТУ) является уменьшение микронеровностей рабочих поверхностей лопаток. Уменьшение микронеровностей позволяет уменьшить аэродинамическое сопротивление путем уменьшения трения. Для уменьшения трения поверхности лопаток ГТУ полируют.

Среди используемых, в настоящее время, методов полировки (механический, химический, физический) наиболее эффективным методом является ионно-лучевое травление [1].

### **Постановка задачи исследования**

Для реализации ионно-лучевого травления используются автономные ионные источники различного типа, позволяющие генерировать потоки ионов требуемых энергий и плотностей.

Наиболее эффективными являются источники плазмы, разработанные на основе плазменных ионных движителей. Один из них – плазменный ионный ускоритель (ПИУ) или источник Кауфмана – является наиболее приемлемым ускорителем для технологических целей. Данный тип ускорителя заряженных частиц позволяет получать квазиравномерное распределение потока ионов по сечению ускорителя с регулируемой в широком диапазоне энергией [2].

К технологическому источнику ионов, предназначенному для ионной полировки поверхностей деталей ГТУ, могут быть предъявлены следующие требования [3]:

- низкая цена ионов (высокий энергетичес-

кий КПД генератора ионов);

- независимая регулировка энергии и плотности ионного потока, поступающего на обрабатываемый объект;

- максимальная, допустимая физическими законами, плотность ионного тока в пучке;

- высокая однородность распределения плотности ионного тока и энергии по сечению пучка;

- ресурс, позволяющий в течение срока эксплуатации окупить изготовление ускорителя.

Одним из основных требований, предъявляемых к ионному ускорителю, является высокая однородность распределения плотности ионов по сечению потока ускорителя (не менее 95 %), что позволяет равномерно обрабатывать крупногабаритные детали [2].

Другим важным требованием является максимальное КПД ускорителя, а именно, уменьшение энергетических затрат на генерацию потока ионов.

КПД ПИУ определяется процессами в ГРК, которые зависят не только от величины и конфигурации магнитного поля, но и от зоны ввода нейтральных атомов рабочего тела (РТ) [4].

Выбор наиболее оптимальной зоны ввода атомов РТ позволит увеличить коэффициент использования РТ. Из вышеизложенного следуют требования, предъявляемые к устройству для ионной полировки: оптимальная конфигурация магнитной системы ПИУ, оптимальная зона ввода атомов рабочего тела в ГРК ПИУ. Задачи исследования разделены на три этапа. На первом этапе разрабатывается математическая модель, позволяющая определять количественные и каче-

ственные характеристики магнитного поля. На втором этапе — сравнение полученных результатов. На третьем этапе — определение наиболее оптимальной зоны ввода атомов РТ.

### Требования, предъявляемые к магнитной системе ПИУ

Для повышения КПД источника ионов магнитная система ПИУ должна обеспечивать следующие условия:

- формировать между полюсными наконечниками замкнутую пространственную конфигурацию магнитного поля определенной формы с обеспечением требуемой магнитной индукции (обеспечивать существование магнитной ловушки);

- обеспечивать минимум «сквозного» электронного тока, т. е. ток электронов, выходящих из катода и уходящих на анод без ионизационных столкновений;

- максимум величины магнитной индукции (между полюсными наконечниками) должен находиться, по возможности, ближе к наружному полюсному наконечнику (магнитное поле оказывает влияние на распределение плотности плазмы по сечению ускорителя перед экраным электродом ИОС);

- величина магнитной индукции должна быть минимальна вблизи ускоряющего электрода (наиболее равномерное распределение плотности ионного потока достигается, если возле ускоряющего электрода будет минимум величины магнитной индукции);

- стабильность магнитной индукции в условиях длительной эксплуатации и температурного воздействия;

- простота конструкции и ее технологичность.

Как правило, магнитная система состоит из: полюсных наконечников, магнитопроводов и источников магнитного поля, которые могут быть представлены в виде: электромагнитных катушек или постоянных магнитов.

Постоянные магниты имеют ряд преимуществ перед электромагнитными устройствами, однако, ряд особенностей (невозможность регулирования величины магнитной индукции во время технологического процесса, старение, низкая рабочая температура) ограничивают их применение.

В свою очередь, электромагнитные устройства позволяют изменять величину магнитной индукции во время технологического процесса, тем самым обеспечивать наиболее оптимальный режим работы ускорителя. Для лабораторной технологической установки наиболее приемлемой является магнитная система на основе электромагнитных устройств, которой свойственно: возможность изменения магнитной индукции в широких пределах, стабильность магнитной индукции в условиях длительной эксплуатации и температурного воздействия.

### Модель магнитной системы ПИУ

В существующих конструкциях полюсные наконечники и магнитопроводы, на которые устанавливаются электромагнитные катушки, изготовлены из низкоуглеродистой стали. В расчете конфигурации магнитного поля учесть все имеющиеся особенности материала сложно, так как низкоуглеродистой стали, как и любому материалу, характерна неоднородность свойств. Достаточно сложно учесть процесс старения низкоуглеродистой стали в зависимости от условий эксплуатации [5]. Следствием этого является использование усредненных характеристик материала магнитопровода и эквивалентной модели расчета.

Модель магнитной системы представлена на рисунке 1.

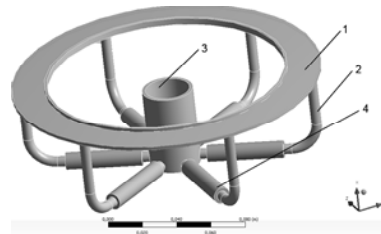


Рис. 1. Модель магнитной системы с электромагнитными катушками: 1 — наружный полюсный наконечник; 2 — магнитопровод; 3 — внутренний полюсный наконечник; 4 — электромагнитная катушка

Разработана математическая модель, позволяющая определять величину и конфигурацию вектора магнитной индукции [4]. Проведено исследование первоначальной конфигурации магнитной системы ПИУ. Результаты расчета приведены на рисунках 2, 3.

Анализ первоначальной конфигурации магнитной системы показывает, что максимум величины магнитной индукции расположен вблизи анода. Магнитные силовые линии пересекают анод, что уменьшает время существования электронов в ГРК.

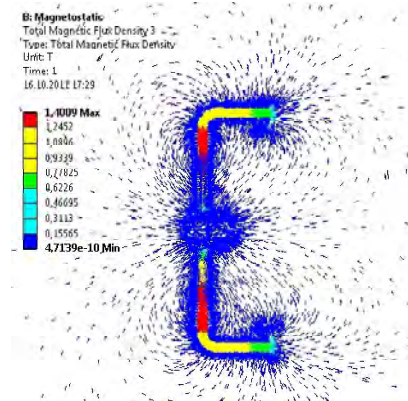


Рис. 2. Распределение вектора магнитной индукции в сечении магнитной системы

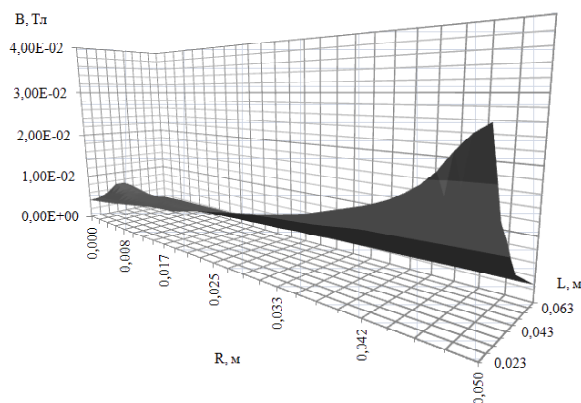


Рис. 3. Величина теоретически определенной магнитной индукции в магнитном зазоре

Магнитная линза между внутренним и наружным магнитопроводами практически отсутствует, что сводит эффективность ускорителя к минимуму.

Изменение конфигурации модели магнитной системы ПИУ дает результаты, представленные на рисунках 4–5.

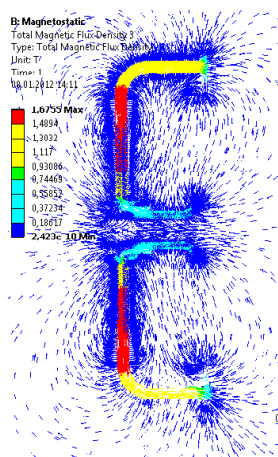


Рис. 4. Распределение магнитных линий в сечении магнитной системы в зазоре между полюсными наконечниками

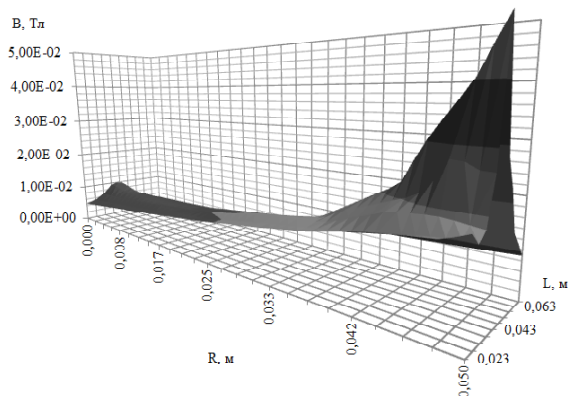


Рис. 5. Величина магнитной индукции в зазоре между полюсными наконечниками

В результате проведенных теоретических исследований получена конфигурация магнитной системы, соответствующая всем предъявляемым к ней требованиям, а именно: получена ярко выраженная магнитная линза между полюсными наконечниками, получен минимум величины магнитной индукции в области ИОС, уменьшен «сквозной» электронный ток.

### Экспериментальное определение конфигурации и величины магнитного поля ионного ускорителя

Для определения величины магнитной индукции использовался стенд, представленный на рисунке 6.

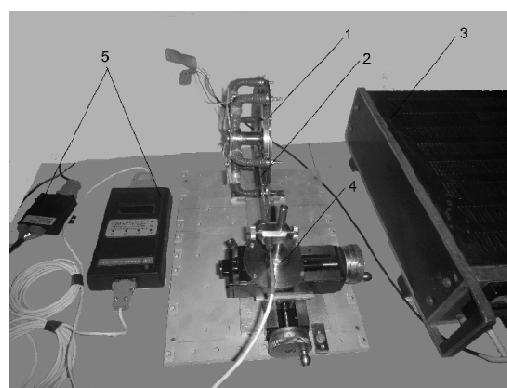


Рис. 6. Стенд для определения магнитной индукции:

- 1 – магнитная система ПИУ; 2 – щуп с датчиком Холла; 3 – СЭП магнитной системы ПИУ; 4 – координатное устройство; 5 – СЭП датчика Холла

В результате эксперимента определены осевая и радиальная составляющие магнитной индукции. По результатам эксперимента определен доверительный интервал и среднее значение магнитной индукции [6, 7].

На рисунке 7 представлено изменение экспериментального значения магнитной индукции (1) с доверительным интервалом и расчетного значения магнитной индукции (2) в зависимости от радиуса.

Изменение относительной погрешности в зависимости от радиуса представлено на рисунке 8.

Максимальная величина относительной погрешности составила 16 %. Таким образом, математическая модель позволяет определять значение магнитной индукции в необходимой области с достаточной точностью.

Для определения качественных характеристик распределения вектора магнитной индукции использовался «метод железных опилок», который позволяет определять конфигурацию магнитных силовых линий. Стенд экспериментального определения распределения магнитной индукции представлен на рисунке 9.

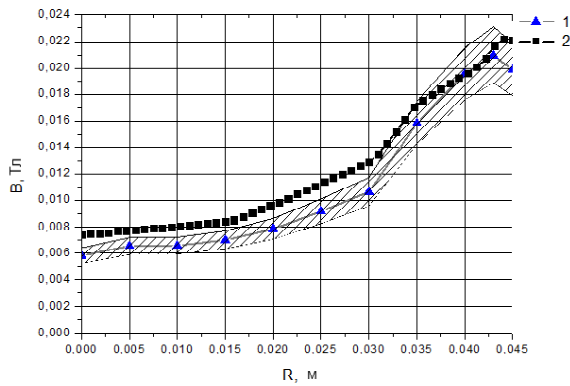


Рис. 7. Изменение теоретического значения магнитной индукции (2) и среднего значения магнитной индукции (1) в зависимости от  $R$

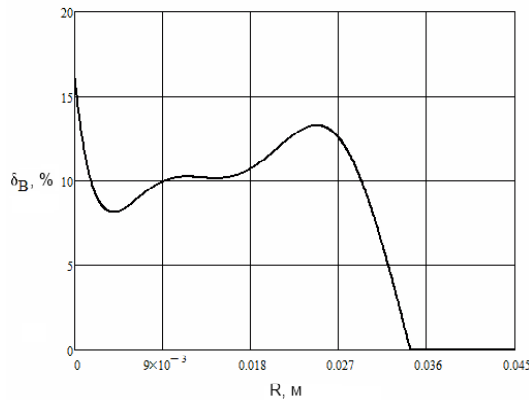


Рис. 8. Относительное значение погрешности расхождения теоретических значений от экспериментальных значений



Рис. 9. Стенд экспериментального определения распределения магнитной индукции:

1 – магнитная система; 2 – лист бумаги с опилками

На рисунке 10 представлено экспериментально определенное распределение магнитной индукции. На рисунке 11 представлено расчетное распределение магнитной индукции.

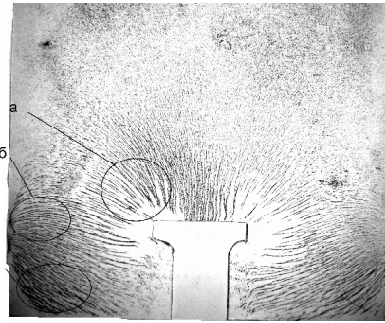


Рис. 10. Экспериментально определенное распределение вектора магнитной индукции (а) и расчетное распределение магнитной индукции

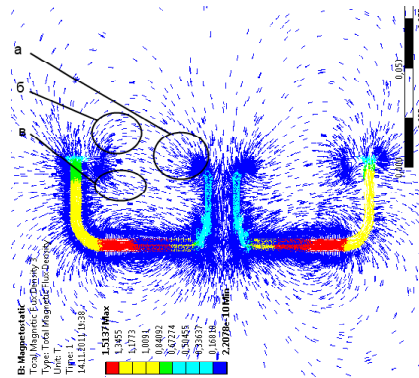


Рис. 11. Расчетное распределение вектора магнитной индукции

Из анализа характерных зон (а, б, в), представленных на рисунке 10 и рисунке 11, можно сделать вывод, что конфигурация распределения магнитной индукции, полученная расчетным путем, идентична конфигурации распределения магнитной индукции, полученной экспериментально.

#### Зона ввода нейтральных атомов РТ в объем камеры

Для оптимальной работы ГРК ПИУ имеет значение зона ввода нейтральных атомов РТ в объем камеры. Основная ионизация РТ происходит в области с максимальной магнитной индукцией, т. е. в области между полюсными наконечниками. Рассмотрим расчетную схему, представленную на рисунке 12.

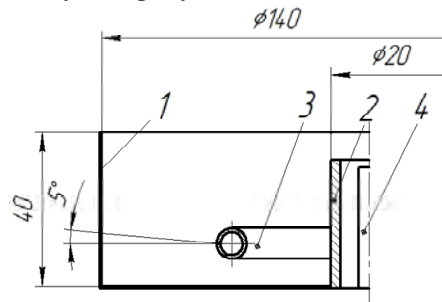


Рис. 12. Расчетная схема определения ввода нейтральных атомов в ГРК: 1 – стенка ГРК; 2 – внутренний полюсный наконечник; 3 – анод-коллектор; 4 – катод

Так как степень ионизации пропорциональна произведению концентрации электронной на концентрацию нейтральной компоненты и ввиду центрального расположения катода, в приосевой зоне концентрация электронной компоненты больше, чем в периферии, то распределение нейтральной компоненты должно иметь обратную закономерность.

Увеличение коэффициента использования рабочего тела возможно за счет увеличения срока существования атомов РТ в ГРК ПИУ. Так как режим течения в ГРК молекулярно-вязкостный, соответственно частоты соударения молекул друг с другом и со стенками вакуумной камеры одинаковы, соответственно если отверстия в аноде-коллекторе расположить только с наружной стороны и под определенным углом, то осевая зона будет обеднена атомами РТ. Для определения угла отверстий в аноде коллекторе использовался метод Монте-Карло, который позволяет определить пространственное распределение формируемых молекулярных потоков [8]. На основании литературного анализа определения плотности потока частиц для данного расчетного случая выбран наиболее оптимальный угол  $5^\circ$  относительно азимутального направления [9].

#### Исследование технологических возможностей устройства для ионной полировки поверхностей лопаток ГТУ

В результате проведения теоретических и экспериментальных исследований разработан ПИУ, представленный на рисунке 13.

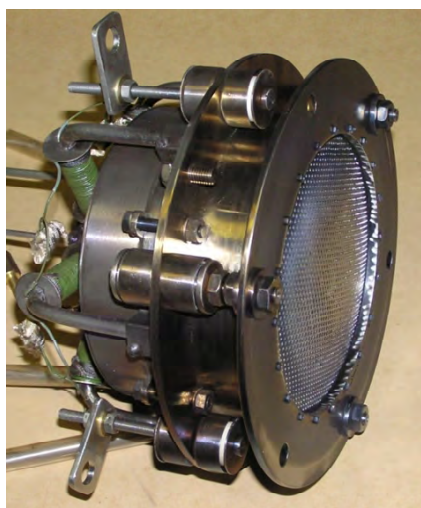


Рис. 13. Плазменно-ионный ускоритель с диаметром ИОС 140 мм

Проведено исследование технологических возможностей ПИУ как устройства для ионной полировки. Результаты представлены на рисунке 14.

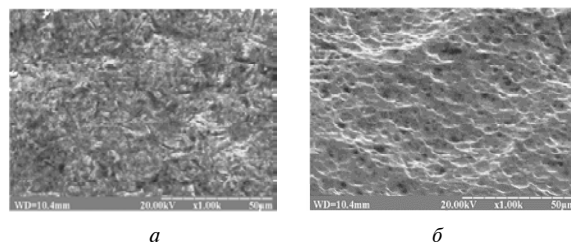


Рис. 14. Микрофотография поверхности лопатки ГТД до проведения ионной полировки при помощи ПИУ (а) и после (б)

#### Выводы

1. На основании литературных данных и поставленной задачи выбран ионный источник и сформулированы требования, предъявляемые к технологическому ускорителю.
2. Разработана модель оптимизации магнитной системы ПИУ. В результате решения оптимизационной задачи определена наиболее оптимальная конфигурация магнитной системы. Проведено сравнение экспериментальных и теоретических результатов распределения вектора магнитной индукции и величины магнитной индукции.
3. Проведен выбор наиболее оптимального угла в аноде-коллекторе для наиболее равномерного распределения плотности ионного потока ускорителя.
4. Проведено исследование технологических возможностей устройства для ионной полировки поверхностей лопаток ГТУ.

#### Список литературы

1. Степанушкин Н. П. Использование плазменного ионного ускорителя для обработки поверхностей / Н. П. Степанушкин, Д. В. Слюсарь, В. П. Колесник // Второй корейско-украинский симпозиум по технологии газотурбинных двигателей. — 2005. — С. 89–94.
2. Белан Н. В. Применение плазменного ионного ускорителя при производстве и ремонте изделий авиационно-космической техники / Н. В. Белан, Прокопенко А. Н., Степанушкин Н. П. // Новые разработки и технологии в газотурбостроении : матер. 2-й науч.-техн. конф. — Кривой рог, 2004. — С. 63–66.
3. Плешивцев Н. В. Физические проблемы катодного распыления / Н. В. Плешивцев. — М. : Атомиздат., 1979. — 87 с.
4. Исаков А. В. Устройство для очистки поверхности лопаток газотурбинной установки / А.В.Исаков // Вестн. Рыбинск. гос. авиац. техн. ун-та. — 2011. — № 2. — С. 58–62. — Библиогр.: с. 62.
5. Дружинин В. В. Магнитные свойства электротехнической стали / В. В. Дружинин. — М. : Энергия, 1974. — 237 с.

6. Касандрова О. Н. Обработка результатов наблюдений / О. Н. Касандрова, В. В. Лебедев. – М. : Наука, 1970. – 104 с.
7. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы / В. П. Преображенский. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.
8. Саксаганский Г. Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах / Г. Л. Саксаганский. – М. : Атомиздат., 1980. – 108 с.
9. Ермаков С. М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы / С. М. Ермаков. – М. : Наука, 1975. – 95 с.

Поступила в редакцию 04.07.2013

**Исаков О.В., Степанушкін М.П., Колесник В.П., Колесник В.В., Гарін А.О. Оптимізація газорозрядної камери технологічного пристрою для іонного полірування поверхні лопаток газотурбінних установок**

*Розглянута можливість підвищення енергетичного КПД джерела іонів і рівномірності розподілу густини іонів по перетину потоку за рахунок оптимізації конфігурації магнітної системи газорозрядної камери плазмово-іонного прискорювача і визначення переважної зони введення плазмоутворюючого газу. Проведено порівняння якісних і кількісних характеристик магнітного поля, отриманих експериментальним і розрахунковим шляхом. Проведено дослідження технологічних можливостей пристрою для іонного полірування поверхонь лопаток ГТУ.*

**Ключові слова:** газорозрядна камера, іонне полірування, магнітна система, оптимізація, плазмово-іонний прискорювач.

**Isakov A., Stepanushkin N., Kolesnik V., Kolesnik V., Garin A. Optimization discharge chamber technological devices for ion surface polishing blades gas turbines**

*Possibility of rise of power is considered coefficient useful effect of source of ions and evenness of distributing of closeness of ions on the section of stream due to optimization of magnetic system configuration of gas-unloading chamber of the plasma-ionic accelerating and determination of preferable area of input inert gas. Comparison of the high-quality and quantitative descriptions of the magnetic field, got an experimental and computation way, is conducted. Research of technological possibilities of device for the ionic polish of surfaces of shoulder-blades of gas-turbine equipment is conducted.*

**Key words:** discharge chamber, ion polishing, magnetic system, optimization, plasma-ion accelerator.