

УДК 621.452.3.034

**Ю.В. РУБЛЕВСКИЙ**, ведущий конструктор ГП «Ивченко-Прогресс»,  
Запорожье;  
**В.Н. ДОЦЕНКО**, д-р техн. наук; проф. НАКУ «ХАИ», Харьков

### **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЩЕТОЧНЫХ УПЛОТНЕНИЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД И СТАЦИОНАРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК**

Представлено состояние работ по исследованию щеточных уплотнений (ЩУ) для снижения утечек в авиационных ГТД и стационарных энергоустановках. Выполнены экспериментальные исследования разных вариантов ЩУ и сравнение их эффективности с традиционными уплотнениями. Установлено, что изменяя параметры ЩУ можно обеспечить их трудоспособность в разных условиях эксплуатации.

Представлений стан робіт з дослідження щіткових ущільнень (ЩУ) для зниження витоків в авіаційних ГТД і стаціонарних енергоустановках. Виконані експериментальні дослідження різних варіантів ЩУ й порівняння їх ефективності із традиційними ущільненнями. Установлене, що змінюючи параметри ЩУ можна забезпечити їхню працездатність у різних умовах експлуатації.

The condition of works research BS for decrease in leaks in aviation GTE and stationary power-house is presented. Experimental researches of various variants BS and comparison of their efficiency with tradition seals are executed. It is established, that changing parametres BS it is possible to provide their working capacity in various conditions of operation.

#### **Введение**

Создание новых и модификация ранее разработанных авиационных ГТД и стационарных энергоустановок выдвигают в настоящее время особые требования к повышению их эффективности. Уменьшение непроизводительных утечек одно из главных направлений решения этой задачи. Снижение утечек достигается за счет совершенствования уплотнений.

Лабиринты это основной вид уплотнения между статорными и роторными узлами в турбостроении сегодня. Утечки через лабиринтное уплотнение зависят от многих факторов таких как: их конструктивное исполнение, технологии изготовления, величина радиального зазора, количество и геометрии гребешков, динамика взаимных перемещений ротора и статора.



Рис. 1. Фрагмент ЩУ

Ведущие мировые разработчики авиационных и стационарных газотурбинных двигателей затрачивают значительные усилия на разработку, испытания и внедрение более эффективных уплотнений, одними из которых являются щеточные уплотнения.

Щеточные уплотнения (рис. 1) представляют собой кольцевую щетку из металлических проволочек малого диаметра из сплавов на

основе никеля, хрома, кобальта, вольфрама или неметаллических волокон. Проволочки располагаются под углом к сопрягаемой поверхности ротора с целью уменьшения трения волокон щеточного уплотнения о роторную деталь.

Для достижения требуемых показателей новых разработок широко используются специальные программы финансируемые правительством. В рамках выполнения таких программ обрабатывались элементы и узлы двигателей, для создания научно-технического задела проводятся исследования и разработки новых видов уплотнений.

Зарубежные информационные источники говорят об отработке и проверке работоспособности и эффективности новых видов уплотнений на фирмах «Роллс-Ройс», «Дженерал Электрик», Пратт-Уитни, Сименс, Мицубиси, Вестенхауз и ряде других фирм, занимающихся разработкой и эксплуатацией авиационных и стационарных ГТД. Для примера в около 70 ГТД GE работают 205 ЩУ, их суммарная наработка составляет 1,4 млн. часов, а на одном из двигателей GE90 достигнута наработка свыше 40000 часов. В NASA выполнены работы по прямому сравнению расхода воздуха через лабиринтное и щеточное уплотнения на двигателе YТ-700 [1].

Оценки показывают, что снижение утечек воздуха в газотурбинном двигателе на 1 % сокращает величину удельного расхода топлива на 0,4 %. На основании статистических данных 2004 года это могло бы обеспечить только американским авиационным компаниям экономию 200 миллионов литров топлива в год. А годовая экономия во всем мире составила бы более миллиарда литров горючего [2].

### Результаты исследований

На ГП «Ивченко-Прогресс» накоплен значительный опыт проведения работ по отработке конструкции и технологии изготовления ЩУ. Разработана методика проверок расходных характеристик и работоспособности различных вариантов ЩУ.

В ходе проведения комплекса испытаний на специально изготовленных установках были определены расходные характеристики различных вариантов щётчных уплотнений, сравнение расходных характеристик щётчных и лабиринтных уплотнений (рис. 2), а так же влияние эксплуатационных факторов на их расходные характеристики.

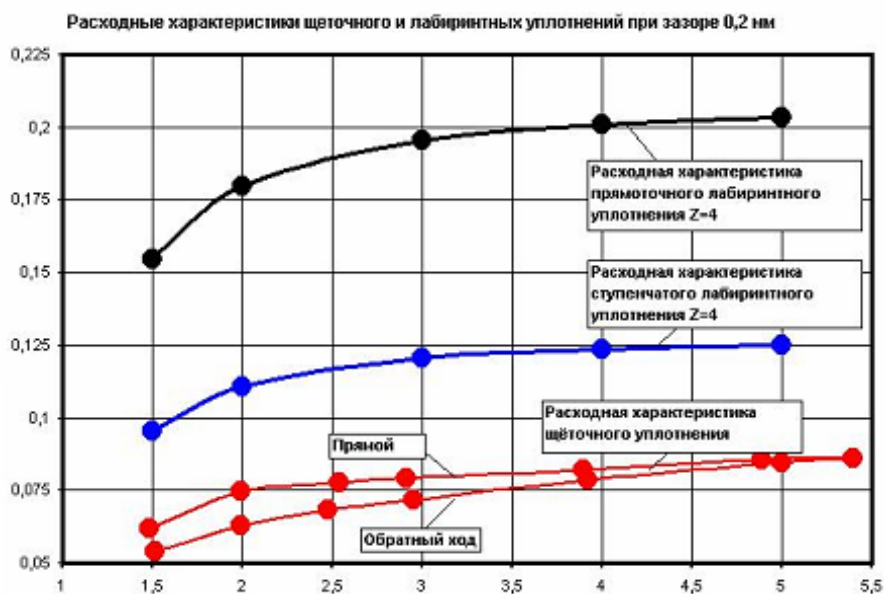


Рис. 2. Сравнение расходных характеристик лабиринтных и щеточных уплотнений

Результаты данных работ позволили перейти к внедрению ЩУ в конструкцию авиационных и стационарных турбин.

На экспериментальном авиационном двигателе Д-27 была выполнена работа по прямому сравнению эффективности системы лабиринтных и щеточных уплотнений в системе компенсации осевого усилия (КОУ) турбины винтовентилятора (рис. 3).

Условия работы системы уплотнений: обороты ротора турбины винтовентилятора (ТВВ) 8440 об/мин, линейные скорости в уплотнениях до 160 м/с, давление воздуха в разгрузочной полости компенсации осевого усилия на шарикоподшипник ротора ТВВ 710 кПа, температура 420 °С.

Для оценки эффективности исследуемых щеточных уплотнений выполнялась специальная препарировка для замера давления в полости КОУ и для замера давлений и температур воздуха в трубопроводе подвода воздуха на компенсацию осевого усилия (для определения расхода воздуха). Препарированный трубопровод подвода воздуха перед постановкой на двигатель проходил специальную тарировку «холодной» продувкой с целью определения расходной характеристики. Для определения температурного состояния детали щеточного уплотнения препарировались датчиками ИМТК (измеритель максимальной температуры кристаллический).

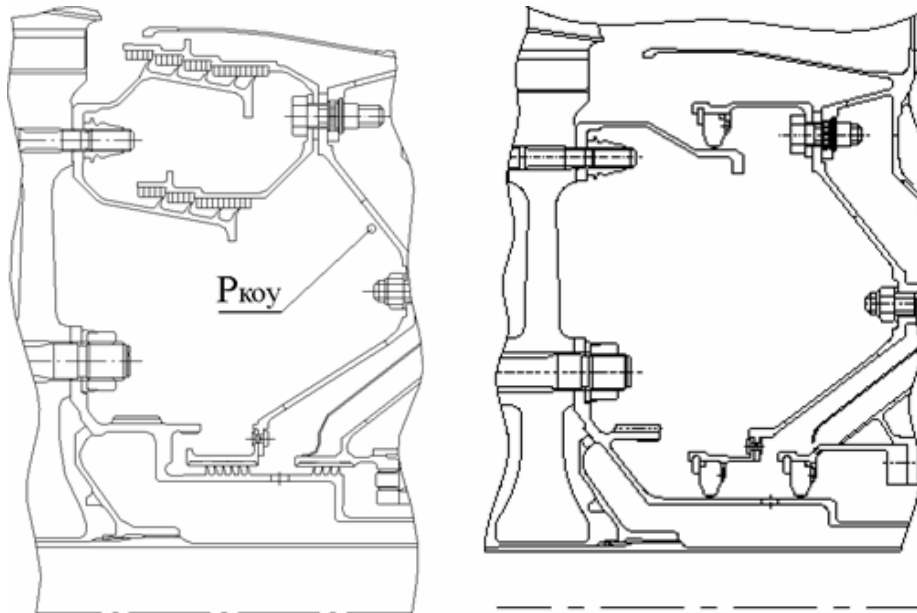


Рис. 3. ЩУ в системе компенсации осевого усилия ТВВ авиационного двигателя

Выполненные работы показали, что данная система ЩУ по эффективности эквивалентна двойному ступенчатому лабиринтному уплотнению с 9-ю гребешками.

В настоящее время продолжают работы по введению ЩУ в конструктивный профиль экспериментального авиационного двигателя.

На базе выполненных работ выполнен комплекс расчетных исследований по улучшению эксплуатационных характеристик турбины наземного применения за счет внедрения ЩУ. Задача заключалась в том, что бы с минимальными переделками и при сохранении исходной конструкции обеспечить возможность установки ЩУ в турбине (рис. 4).

Условия работы системы уплотнений: обороты ротора турбины 8650 об/мин, линейные скорости в уплотнениях до 177 м/с, давление воздуха в разгрузочной полости 4 кГ/см<sup>2</sup>, температура 350 °С.

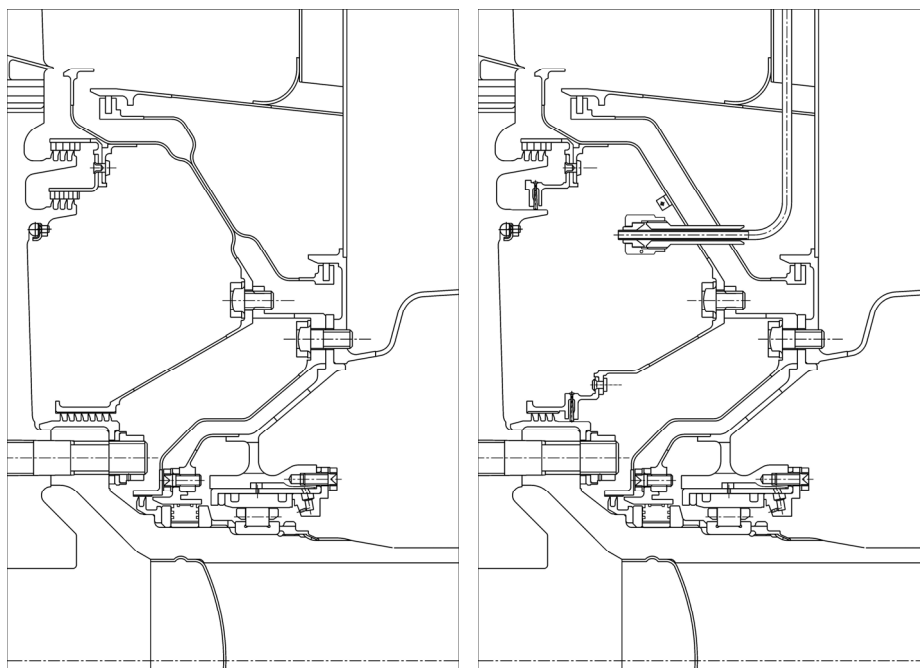


Рис. 4. ЩУ в турбине ГТП наземного применения

Расход воздуха через уплотнения разгрузочной полости уменьшается на 0,5 %, при этом температура газа на входе в ТВД снижается на 4°, а ресурс рабочей лопатки ТВД может быть увеличен на 3000 ч.

По результатам расчётных исследований выпущена конструкторская документация и изготовлены экспериментальные образцы для проверки эффективности мероприятий на изделии АИ-336-6,3.

На работоспособность ЩУ влияют множество конструктивно-технологических параметров, основные из которых: высота уплотнительного элемента, диаметр микропроволочек и их материал, толщина уплотнительного элемента, угол наклона микропроволочек. Изменяя эти параметры ЩУ можно добиваться оптимальных условий работы щеточного уплотнения. ЩУ можно с успехом применять там, где необходимо разделить две среды. При этом, как сообщает R.C. Hendricks, перепад давлений может достигать 10 кг/см<sup>2</sup>, линейные скорости в уплотнениях 160 м/с, а температура 680 °С [1].

За рубежом щеточные уплотнения повсеместно применяется практически во всех отраслях промышленности. По данным фирмы Sealeze такие уплотнения могут значительно повысить эффективность вентилятора подачи воздуха в котёл-подогреватель ТЭС. Некоторые устройства с такими уплотнениями были в эксплуатации в течение восьми лет между инспекциями.

Радиальные, осевые и окружные металлических полосы устанавливаемые в настоящее время на поворотном регенеративном подогревателе воздуха разработаны почти столетие назад. К сожалению металлическая полоса деформируется сразу же после установки. Это приводит к большим перетеканиям воздуха, увеличению потребляемой мощности вентилятора и росту расхода топлива.

Щеточные уплотнения (рис. 5) идеально подходят для замены полосы стали на регенеративных подогревателях воздуха. Жесткие уплотнения быстро изнашиваются, так как они не в состоянии соответствовать неровности поверхности и разного размера

зазора. Полосы уплотнения также уязвимы к повреждениям при больших перепадах давления и расширение за счет повышения температуры (рис. 6).



Рис. 5. Общий вид щеточного уплотнения фирмы Sealeze

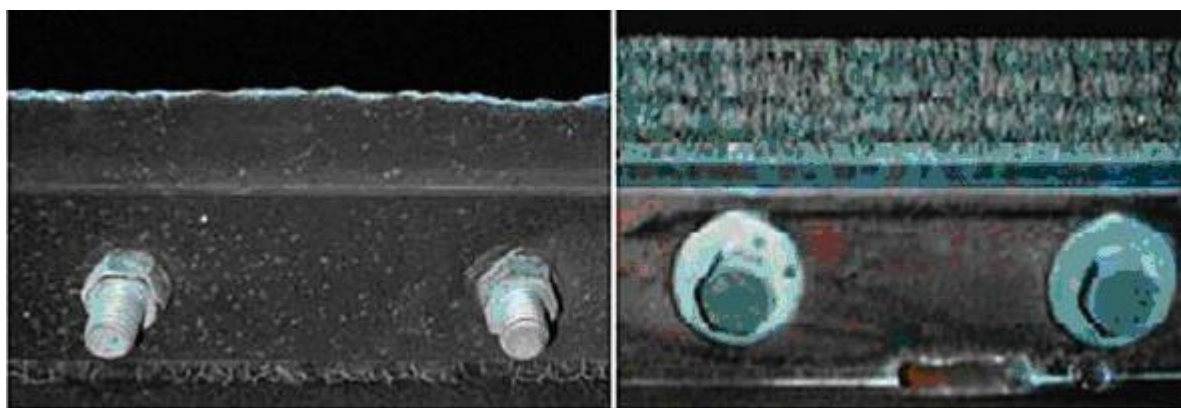


Рис. 6. Степень износа очевидна при сравнении металлической полосы уплотнения (слева) и нового щеточного уплотнения (справа). По материалам фирмы Sealeze

Эффект от применения щеточных уплотнений может быть значительным. Улучшение уплотнений подогревателя воздуха ведет к увеличению КПД котла и может снизить расход топлива на 2 %. В условиях США, при поставочной стоимости угля 80 \$ за тонну, годовая экономия составляет почти 3 млн. \$.

### Выводы

Прогрессивные конструкторско-технологические решения, отработанные в аэрокосмической отрасли промышленности необходимо применять в стационарных энергоустановках, где они могут дать значительный экономический эффект.

Применение новых видов уплотнений, таких как щеточные уплотнения, является одним из эффективных путей сбережения энергоресурсов, что особенно актуально в настоящее время для энергетики Украины.

**Список литературы:** 1. *Hendricks, R.C.* Relative Performance Comparison Between Baseline Labyrinth and Dual-Brush Compressor Discharge Seals in a YF-700 Engine Test [Text] / R.C. Hendricks, T.A. Griffin and T.R. Kline, K.R. Csavina, A. Pancholi and D. Sood // NASA Technical Memorandum 106360. – 1994. – 23 p.  
2. *Chupp, R.E.* Sealing in Turbomachinery [Text] / R.E. Chupp, R.C. Hendricks, S.B. Lattime, B.M. Steinetz // NASA (Glen Research Center, Cleveland, Ohio) / TM (Timken Company, North Canton, Ohio), August 2006.

© Рублевский Ю.В., Доценко В.Н., 2012  
Поступила в редколлегию 20.02.12