

Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки (ОКБ им. А. Люльки)  
филиал ПАО «Уфимское моторостроительное производственное объединение»  
ул. Касаткина, 13, г. Москва, Российская Федерация, 129301  
Тел.: +7 (495) 783-01-11, факс: +7 (495) 683-09-97, 686-75-66, <http://www.umpo.ru>, e-mail: [okb@okb.umpo.ru](mailto:okb@okb.umpo.ru)  
ОГРН 1020202388359, ИНН 0273008320, КПП 771643001

17.05.17 № 260-2700/916  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный конструктор-  
директор ОКБ им. А. Люльки,  
доктор технических наук, профессор



Е.Ю.Марчуков

### ОТЗЫВ

на диссертацию Зайцева Андрея Николаевича  
**« Исследование эксплуатационных характеристик плазменных  
электроизоляционных радиационностойких покрытий в узлах трения  
термоядерных реакторов»,**  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.02.04 –Трение и износ в машинах.

#### 1. Актуальность темы

Развитие термоядерной энергетики связано с обеспечением доступной электроэнергией потенциальных потребителей с одновременным снижением выброса углекислого газа, являющимся важнейшей экологической проблемой. При создании термоядерных энергетических реакторов имеется ряд нерешенных проблем, одной из которой является обеспечение безотказной и долговечной работы узлов сухого трения с электроизоляционным покрытием (ЭИП) в экстремальных условиях эксплуатации. Выход из строя узла трения с ЭИП приводит к необходимости остановки и ремонта реактора, что представляет большую сложность.

Циклический режим работы термоядерного реактора в сочетании с нестабильностью температурных и силовых факторов вызывает перемещение деталей с ЭИП в местах их установки. Особое внимание к триботехническим свойствам ЭИП обусловлено наличием сухого трения и малых амплитуд перемещения при повышенной температуре в вакууме, способствующих интенсивному изнашиванию и росту коэффициента трения.

## 2. Научная новизна

Объектом исследования являются электроизоляционные радиационно-стойкие покрытия узлов трения агрегатов термоядерных реакторов, работающие в условиях сухого трения при малых скоростях скольжения, высоких статических и динамических нагрузках в вакууме при высоких температурах и воздействии радиационного облучения.

Автором построена и экспериментально подтверждена модель изнашивания плазменного ЭИП- $\text{Al}_2\text{O}_3$ , описывающая физическую картину износа в паре со сталью 316L(N)-IG и алюминиевой бронзой БрАЖНМц9-4-4.

Разработана математическая модель коэффициента трения скольжения плазменного покрытия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в паре со сталью 316L(N)-IG и алюминиевой бронзой БрАЖНМц9-4-4-1.

Предложено использовать прочность сцепления на сдвиг при сжатии ЭИП в качестве критерия оценки прочности газотермических покрытий модулей blankets международного экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР).

Установлена и экспериментально подтверждена математическая зависимость прочности сцепления на сдвиг при сжатии плазменного ЭИП- $\text{Al}_2\text{O}_3$  от величины контактных нагрузок.

Теоретически обоснована область физико-механических параметров, при которых возникает разрушение плазменного ЭИП- $\text{Al}_2\text{O}_3$  модулей blankets ИТЭР.

## 3. Значимость работы

Разработанная автором методика расчета толщин ЭИП изделий узлов трения термоядерных реакторов по критерию электрического сопротивления позволяет учитывать факторы, снижающие электроизоляционные свойства покрытий в процессе эксплуатации реактора и может применяться для определения оптимальной толщины покрытия.

Разработанная методика делает возможным прогнозирование критического уровня сдвиговых напряжений в трибопарах ЭИП-металл узлов трения термоядерных реакторов.

Минимальные толщины плазменных ЭИП- $\text{Al}_2\text{O}_3$  изделий модулей blankets ИТЭР, полученные расчетным путем, обеспечат требуемое электрическое сопротивление в течение заданного периода эксплуатации реактора, что повысит работоспособность и снизит себестоимость изделий с ЭИП.

Предложенные автором конструкторские решения позволяют снизить касательные напряжения в трибопарах ЭИП-металл модулей blankets ИТЭР тяжело нагруженных узлов трения до допустимых значений.

В качестве пожелания дальнейшего развития работы можно отнести дополнение ее термодинамическими расчетами, в частности моделями определения температуры вспышки в зоне контакта пар трения и скорости отвода тепловой энергии.

#### 4 Заключение

Представленная к защите работа выполнена на высоком научном, методическом и экспериментальном уровне. Работа полностью отвечает требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ (№842, от 24 сентября 2013 ).

Автор работы, Зайцев Андрей Николаевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.04 – Трение и износ в машинах.

Начальник отдела,  
главный специалист  
ОКБ им. А.М. Люльки,  
филиала ПАО «УМПО»



Исаев Виктор Анатольевич

РФ, 129301, г. Москва, ул. Касаткина, д.13, тел. (499) 755-05-61,  
[okb@okb.umpo.ru](mailto:okb@okb.umpo.ru).