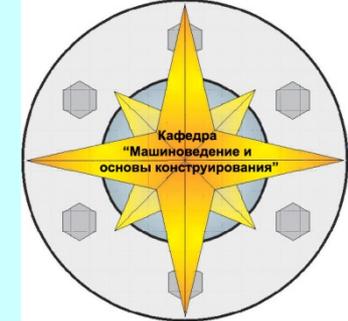




**Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра  
Великого**  
**«Научно-технический совет СПбПУ»**  
**24 февраля 2016 г.**  
**Санкт-Петербург**



**Отчет за первый год подготовки докторанта, к.т.н., доц.  
Крылова Николая Александровича**

на кафедре

**«Машинноеведение и основы конструирования» ИММиТ**

**«Повышение износостойкости лопаток паровых турбин с учетом  
волновой природы пластической деформации при  
высокоскоростных процессах»**

Научный консультант, зав. кафедрой, д.т.н., профессор

**Скотникова Маргарита Александровна**

Работа выполняется при финансовой поддержке Минобрнауки России  
в рамках грантов № 933 и № 1972 (2014 - 2016 г.г.)

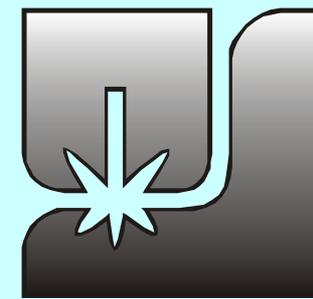
**«Повышение каплеударной эрозионной стойкости титановых лопаток паровых турбин»**



Специальность **05.16.01** «Металловедение и термическая  
обработка металлов и сплавов»

Срок подготовки:

С **01 февраля 2015 г.** по **01 февраля 2018 г.**



## Актуальность темы.

# Каплеударная эрозия лопаток паровых турбин



Паровая турбина,  
на Костромской ГРЭС

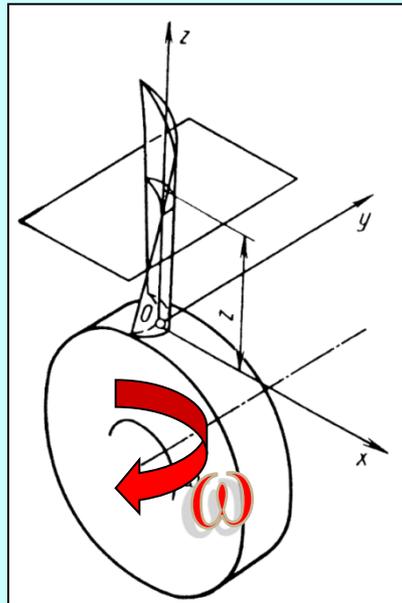


Схема работы лопатки  
паровой турбины

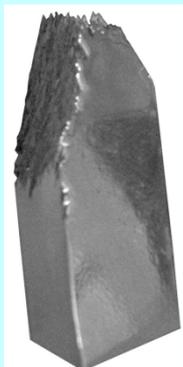
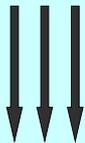
Мощность паровых турбин возрастает в результате увеличения рабочей длины лопаток, и увеличения их окружной скорости. Поток частиц водяного пара налетает на входную кромку со скоростью **300-600 м/с**.

При этом возникает ряд **проблем**:

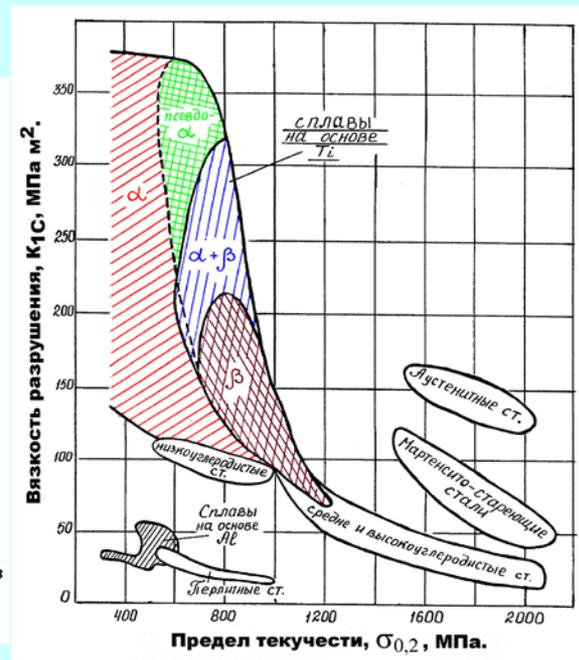
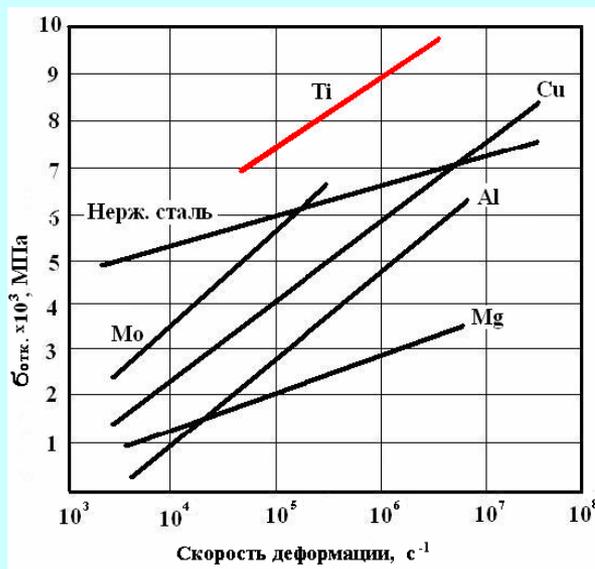
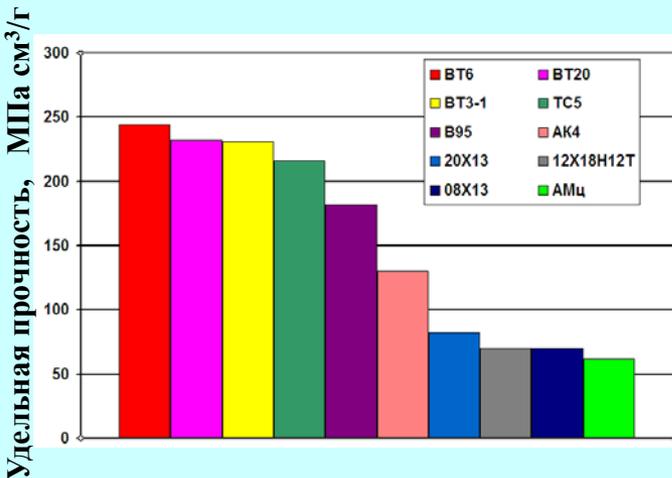
- 1.** С увеличением скорости воздействия частиц пара, возрастает каплеударный «эрозионный износ» материала входных кромок лопаток паровых турбин, как следствие уменьшается сечение лопаток, **снижается КПД работы всей паровой турбины**.
- 2.** Увеличение размеров лопаток, приводит к проблемам **структурной и химической неоднородности** по сечению крупногабаритных заготовок.
- 3.** С увеличением скорости контактного взаимодействия кромок лопаток паровых турбин, с потоком частиц водяного пара выше определенного уровня (скорость деформации  $10+4 \dots 10+6$ , 1/сек.), пластическая деформация приобретает **волновой характер**, наблюдается её периодическая **локализация на мезоскопическом уровне**. В местах локализации преждевременно появляются **зародышевые трещины**.

# Преимущества титановых сплавов при создании лопаток паровых турбин

Частицы пара  
 Ø 100...300мкм  
 Скорость 150...600 м/с



- Низкая плотность;
- Высокая удельная прочность и вязкость разрушения;
- Коррозионная стойкость, немагнитность;
- Поллиморфизм, склонности к фазовым превращениям;
- Стойкость к ударному нагружению при скорости пластической деформации  $= \dot{\epsilon} 0^{+5} \dots 10^{+6} \text{ с}^{-1}$  определили их широкое применение в машиностроении, особенно при создании лопаток паровых турбин.



Сводный график удельной прочности различных конструкционных материалов

[1] Каннель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В. Ударно-волновые явления конденсированных средах – М.: Янус-К2, 1999 – 408 с.

[2] Микляев П.Г., Нешпор Г.С., Кудряшов В.Г. Кинетика разрушения – М: Metallurgy, 1979 – 279 с.

# Цель и задачи работы.

## «Повышение износостойкости лопаток паровых турбин с учетом волновой природы пластической деформации при высокоскоростных процессах»

**Целью настоящей работы** является изучение закономерностей структурных и фазовых превращений и перераспределения легирующих элементов в материале титановых лопаток паровых турбин, как на **этапе формирования** штампованных заготовок и их механической обработки, так и в материале готового изделия на **этапе его эксплуатации** в процессе ударного воздействия частицами пара.

**Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие задачи:**

1. Разработка методического подхода, который позволит адекватно моделировать высокоскоростное каплеударное нагружение и проводить количественную оценку не только эрозионного повреждения, но и динамических свойств образцов-свидетелей из лопаточных материалов с учетом волновой природы пластической деформации и разрушения;
2. Выбрать научно-обоснованный параметр для количественной оценки динамической прочности лопаточных материалов, получаемый при одноосном ударном нагружении, моделирующем действие частиц пара при скоростях 150...600 м/с;
3. Разработка испытательной центробежной установки (ИЦУ-40), имитирующей каплеударное воздействие частицами пара со скоростью 150...600 м/сек.;
4. Разработка математической модели износа лопаток паровых турбин в результате каплеударной эрозии;
5. Разработка научно-обоснованного технологического процесса, учитывающего структурные и фазовые превращения в материале заготовок титановых лопаток паровых турбин *на этапе их изготовления* (штамповки) и *на этапе их механической обработки* (фрезерования);
6. Исследование структурных и фазовых превращений в объеме титановых лопаток паровых турбин *на этапе их эксплуатации*.
7. Рекомендации для повышения износостойкости лопаток паровых турбин, путем создания регламентированной структуры с заданными и стабильными свойствами, учитывающими высокие ударные нагрузки при эксплуатации со скоростями деформации до  $10^{+6}$  1/сек.

## Участие в работе по грантам:

### «Повышение износостойкости лопаток паровых турбин с учетом волновой природы пластической деформации при высокоскоростных процессах»

За все время работы над тематикой диссертационной работы была получена поддержка:

- **в рамках** личного Гранта среди **студентов** и научной молодежи Санкт-Петербурга в **2003** г на тему «Структурно-фазовые превращения в металлических заготовках при высокоскоростном нагружении» (н.р. М.А. Скотникова);
- **в рамках** личного Гранта среди **аспирантов** и научной молодежи Санкт-Петербурга в **2006** г на тему «Повышение эффективности высокоскоростной механической обработки титановых заготовок с учётом волновой теории пластической деформации» (н.р. М.А. Скотникова);
- **в рамках Гранта РФФИ** на тему «Структурно-фазовые превращения в металле лопаток паровых турбин из сплавов титана после высокоскоростной обработки» № 05-08-65442 (**2005 - 2008** гг.) (н.р. М.А. Скотникова).
- На данный момент работа выполняется в рамках Грантов Минобрнауки России на тему «Повышение каплеударной эрозионной стойкости титановых лопаток паровых турбин» № 933 и № 1972 (2014 - 2016 г.г.) (н.р. М.А. Скотникова).

## Научная новизна и практическая значимость.

### «Повышение износостойкости лопаток паровых турбин с учетом волновой природы пластической деформации при высокоскоростных процессах»

- **Научная новизна исследования.**
- Показано, что при высокоскоростном нагружении лопаток паровых турбин из двухфазных титановых сплавов, в материале формируется *нагружающая волна пластической деформации*, которая по мере своего движения *модулирует структуру материала*, разбивая ее на периодические самосогласованные мезо-объемы.
- Формирование в материале заготовок *модулированной высокопрочной вторичной структуры* приводит к повышению защитной износостойкости обрабатываемого материала заготовки, и снижает износостойкость режущей кромки инструмента.
- Разработана модель стружкообразования при скоростной механической обработке заготовок.
- Сделан выбор оптимального режима термомеханической обработки металла лопаток паровых турбин из сплавов титана, как результат понимания структурно-фазовых превращений в процессе обработки.
- Показано, что *основным механизмом торможения ударной волны при каплеударном воздействии является превращение  $\beta$ - фазы в относительно мягкий орторомбический мартенсит  $\beta \rightarrow \alpha//$ .*
- Исследована смена механизма пластической деформации: трансляционной на ротационную и сопутствующие процессы тепловыделения.
- В результате проведенных исследований получены новые технические решения, подтвержденные патентом РФ.
- **Практическая значимость исследования** заключается в том, что полученный комплекс результатов структурных и фазовых превращений и физико-механических свойств титановых сплавов в процессе высокоскоростной обработки позволил дать рекомендации для повышения износостойкости лопаток паровых турбин, путем создания регламентированной структуры с заданными и стабильными свойствами, учитывающими высокие ударные нагрузки при эксплуатации со скоростями деформации до  $10^{+6}$  1/сек.

# Апробация работы.

## «Повышение износостойкости лопаток паровых турбин с учетом волновой природы пластической деформации при высокоскоростных процессах»

- Основные положения диссертационной работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на **20** научно-технических конференциях и семинарах, в том числе на:
- VII Санкт-Петербургской ассамблее молодых учёных и специалистов «Молодые учёные – Промышленности Северо-западного региона», СПбГПУ, СПб, **2002**; XIV международной конференции «Петербургские чтения по проблемам прочности», РАН, СПб, **2003**; III международной конференции «Фазовые превращения и прочность кристаллов», Институт физики твёрдого тела РАН, Черноголовка, **2004**; 10ой, 11ой, 12ой международных научно-технических конференциях «Проблемы ресурса и безопасной эксплуатации материалов», СПбГУНИПТ, СПб, **2004, 2005, 2007**; 13th American Physical Society Topical Conference on «Shock Compression of Condensed Matter», Portland, Oregon, USA, **2003**; II международной школе «Физическое материаловедение», УГТУ, Тольятти, **2006**; I, II международных симпозиумах «Физика и механика больших пластических деформаций», ЦНИИ КМ «Прометей», СПб, **2002 2007**; The 11th World Conference on Titanium, Kyoto, Japan, **2007**; First forum of young researchers. In the framework of International Forum «Education Quality - **2008**», ИжГТУ, Ижевск, **2008**; «V Всероссийская межвузовская конференция молодых Ученых», СПб – **2008**; «XVI Зимняя школа по механике сплошных сред», Пермь – **2009**; Международная конференция «Математическое моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов, СПб – **2009**; V Международная научно-техническая конференция «Диагностика оборудования и конструкций с использованием магнитной памяти металла», Москва – **2009**; «Техника и технологии трибологических исследований». II Международный семинар, Иваново – **2009**; 12-я Международная научно-практическая конференция «Ресурсосберегающие технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки от нано- до макроуровня» - **2010**; Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС, СПб - **2010**; Conference Tribology and Design, Algarve – **2010**; Tech Connect World Conference and Expo, California – **2010**; 9ая Международная научно-практическая конференция: "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности" - **2010**; «Трибология – машиностроению. Научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов, посвящённая 120-летию выдающегося триболога М.М. Хрущёва» - **2010**; Современные металлические материалы и технологии (СММТ) – **2011**; Международная научно-практическая конференция "Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития» - **2012**; «ТрансТрибо», СПб., –**2010, 2013**; Наука и образование: Междунар. науч.-практ. конференция. СПб – **2013**; International World Tribology Congress, Torino **2013**; 1st Annual World Congress of Smart Materials – **2015**; Proceedings of the Closing Conference of the Project «Doctoral School of Energy and Geotechnology II **2015**»; Научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» **2015**; International Conference BALTRIB' **2015**; 16th International Workshop on New Approaches to High-Tech: NanoDesign, Technology, Computer Simulations – NDTCS' **2015**; 24th International Conference Engineering materials & tribology - BALMATTRIB **2015**

## Участие в 5 международных конференциях в 2015 году.

«Повышение износостойкости лопаток паровых турбин с учетом волновой природы пластической деформации при высокоскоростных процессах»

- 1. BALTMATRIB 2015, Таллинн,
- 2. BALTRIB' 2015, Каунас, Литва
- 3. Doctoral School of Energy and Geotechnology, Parnu, Эстония
- 4. NDTCS-2015, Гродно, Беларуссия
- 5. WCSM-2015 Bit,s 1st Annual World Congress of Smart Materials-2015, Бусан, Южная Корея.

# Поездка в рамках Госзадания на Конференцию «The 15th International Symposium "Topical Problems in the field of electrical and power engineering" and

## "Doctoral school of energy and geotechnology II"

с 12 по 16 января 2015 г. Таллиннский  
Университет Технологий (TUT, Estonia)

TALLINN UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY



Certificate of Attendance

This is to certify that

*Margarita Skotnikova*

RUSSE

has provided a tu

Closing Conference

"Doctoral School of Energy

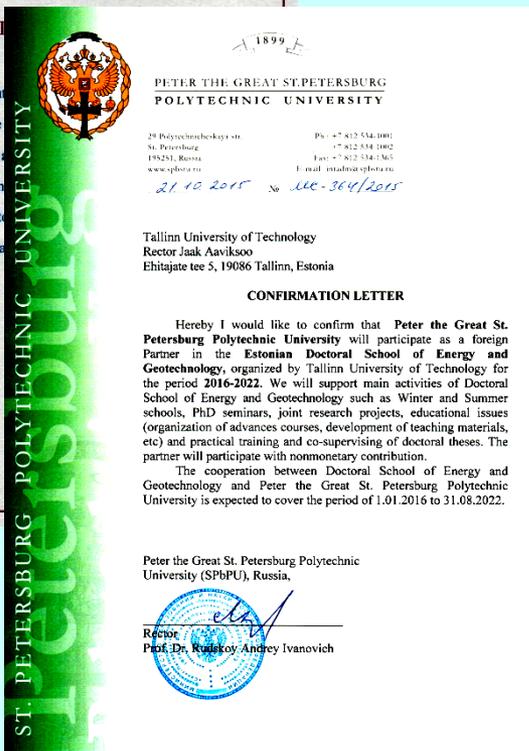
held in

Pärnu, Est

on 12-17 Januar

General Chairman

Dr. Dmitri Vinnikov



**Title:** M.A. Skotnikova, N.A. Krylov, E.  
K. Ivanov, G.V. Tsvetkova, V.V.  
Medvedeva.

«Influence of Geomaterials on Increase  
of Wear Resistance of Friction Pairs»  
St. Petersburg State Polytechnical  
University (Russia)



# BIT's 1<sup>st</sup> Annual World Congress of Smart Materials-2015

Theme: Co-creating Dream of Smartness

Time: March 23-25, 2015    Venue: Busan, Republic of Korea



**Title:** M.A. Skotnikova, N.A. Krylov, A. A. Lanina

**«STRUCTURAL - PHASE TRANSFORMATION ALSO DESTRUCTION OF TITANIUM ALLOYS AT HIGH-SPEED TECHNOLOGICAL PROCESSES»**

St. Petersburg State Polytechnical University  
(Russia)

# Поездка на Международную Конференцию «BALTMATRIB 2015»

November 05-06, 2015 at "Tallinn University of Technology" (Tallinn, Estonia)



**Title:** M.A. Skotnikova,  
G.V.Tsvetkova, N.A.Krylov,  
E.K.Ivanov, V.V.Medvedeva

**«Features of Wear of Abrasive  
Grains Depending  
on Microcuttings Speed of  
Steels»**

St. Petersburg State  
Polytechnical University (Russia)

# Публикации.

## «Повышение износостойкости лопаток паровых турбин с учетом волновой природы пластической деформации при высокоскоростных процессах»

- Основное содержание работы отражено в **50** печатных работах, в том числе в **4** объекта интеллектуальной собственности, **10** работ опубликовано в рецензируемых научных журналах рекомендованном ВАК, **22** работы в научных журналах из списка РИНЦ; **4** статьи опубликованы в научных журналах индексируемых в базе данных Scopus.
- В том числе на английском языке опубликовано **23** работы.

## За 2015 год опубликовано 10 работ: Научные публикации за 2015 год

1. Skotnikova M.A., **Krylov N.A.**, Tsvetkova G.V., Lanina A.A., Ivanova G.V. Structural and phase transformation in material of blades of steam turbines from titanium alloy after technological treatment. Lecture Notes in Control and Information Sciences. 2015. Т. 22. С. 93-101. (**Scopus, РИНЦ**)
2. Skotnikova M.A., **Krylov N.A.**, Lanina A.A, Structural - Phase Transformation Also destruction of Titanium Alloys at High-Speed technological processes. Abstract Book. Bit, s 1st Annual World Congress of Smart Materials-2015, с. 144
3. Skotnikova M.A., Tsvetkova G.V., **Krylov N.A.**, Ivanov E.K., Medvedeva V.V., Influence of Geomaterials on Increase of Wear Resistance of Friction Pairs. Proceedings of the Closing Conference of the Project "Doctoral School of Energy and Geotechnology II", с. 7-9
4. В.В. Медведева, М.А. Скотникова, А.Д. Бреки, **Н.А. Крылов**, Ю.А. Фадин, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков. Оценка влияния размера частиц и концентрации порошков горных пород на противоизносные свойства жидких смазочных композиций Вестник ТулГУ (**РИНЦ, ВАК**)
5. **Крылов Н.А.**, Медведева В.В., Сравнительное исследование противоизносных свойств синтетических и минеральных масел, содержащих частицы геомодификатора Научно-практическая конференция с международным участием «Неделя науки СПбПУ» (**РИНЦ**)
6. Margarita A. Skotnikova, **Nikolay A. Krylov**, Galina V. Tsvetkova, Evgeniy K. Ivanov, Viktoriya V. Medvedeva and Nikolay V. Bezenkin Features of wear of abrasive grains depending on microcuttings speed of steels. Engineering materials & tribology. November 5–6, 2015, Tallinn, Estonia, p. 189-194 (**Scopus**)
7. Victoria Medvedeva, **Nikolay Krylov**, Margarita Skotnikova, Alexander Breki. Research of the influence finely dispersed friction modifiers on the anti-wear properties of grease lubricants. Proceedings of the International Conference BALTRIB'2015. 26-27 November 2015, Aleksandras Stulginskis University, Akademija, Kaunas, Lithuania.
8. **Krylov N.**, Skotnikova M., Tsvetkova G., Ivanova G. Influence of structure and phase composition of the material steam turbine blades from titanium alloys on their resistance to erosive destruction. Proceedings of Sixteenth International Workshop on New Approaches to High-Tech: NanoDesign, Technology, Computer Simulations – NDTCS'2015, September 22-25, 2015, Grodno, Belarus, GRSU, p. 27.

## Интеллектуальная собственность за 2015 год.

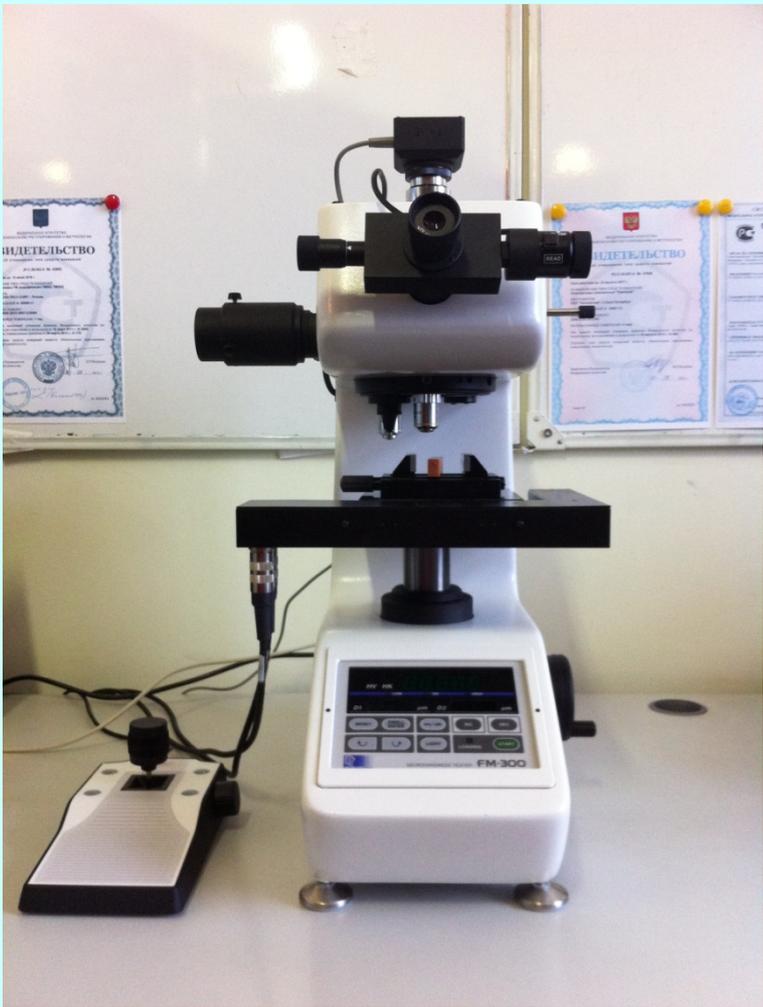
«Повышение износостойкости лопаток паровых турбин с учетом волновой природы пластической деформации при высокоскоростных процессах»

- Демин В.Я., Иванов Е.К., Скотникова М.А., **Крылов Н.А.**  
**Полезная модель:** Устройство для передачи вращательного движения с возможностью холостого хода (РФ № 153493, Начало действия: **01.01.2015**).  
<http://www1.fips.ru/Archive/PAT/2015FULL/2015.07.20/DOC/RUNWU1/000/000/000/153/493/document.pdf>
- **Крылов Н.А.**, Скотникова М.А., Снетков В.В.  
**Программа для ЭВМ:** Расчет остаточных напряжений в сечениях изделий из ОЦК и ГПУ – материалов, с учётом их перераспределения вблизи концентраторов (№2015616830, Начало действия: **24.06.2015**).  
<http://www1.fips.ru/Archive/EVM/2015/2015.07.20/DOC/RUNW/000/002/015/616/830/document.pdf>

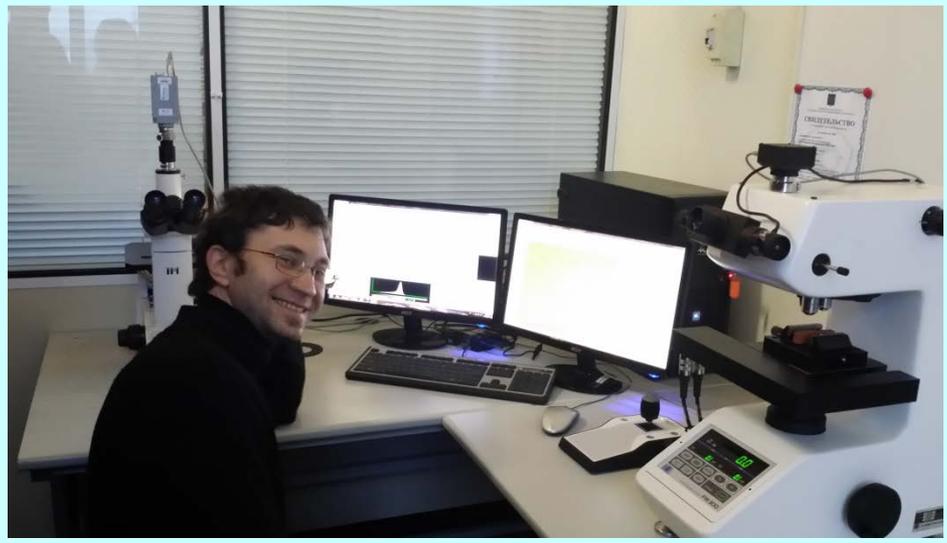
## ПОКАЗАТЕЛИ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ

№	Вид деятельности	Всего по теме диссертации	За 2015
1	Количество статей в научных журналах из списка РИНЦ	22	3
2	Количество статей в научных журналах из списка ВАК	10	1
3	Количество статей в научных журналах индексируемых в базе данных Web of Science Scopus	4	2
4	Количество выступлений с докладом на конференциях	36	5
5	Количество публикаций на английском языке	23	6
6	Количество полученных охранных документов на результаты интеллектуальной деятельности, полученных в рамках темы диссертации	4	2
7	Количество учебников и учебных пособий	3	0
8	Количество монографий	0	0

# Покупка оборудования в 2015 году для проведения исследований



Автоматизированный микротвердомер –  
**Future Tech FM-300 (Япония)**



Стоимость оборудования 1.732.500,00 руб.

# Покупка оборудования в 2015 году для проведения исследований

Прибор для измерения краевого угла смачивания **DSA 25E (Германия)**



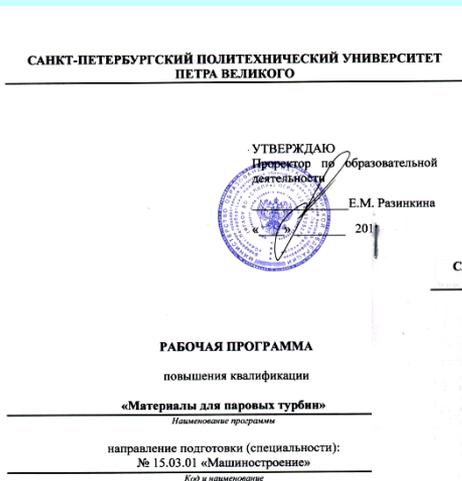
Стоимость оборудования 1.041.600,00 руб.

# Использование результатов работы в рамках ФПК для ОАО «Силловые машины»

1. Разработана Программа и Учебно-тематический план повышения квалификации

## «Материалы для гидротурбин»

2. Проведено обучение слушателей ОАО «Силловые машины» с 18.06.15 по 02.07.15.



Санкт-Петербург  
2015



Целью реализации программы повышения квалификации является изучение теоретических положений для повышения срока службы изделий турбостроения: выбора их материала, диагностики износа, измерения твердости поверхности, установления межремонтных циклов в рамках контроля параметров технической эксплуатации гидравлических турбин, подготовки к производственно-технической деятельности по полученной ранее специальности с привлечением современных информационных технологий.

Категория слушателей: лица, желающие освоить программу повышения квалификации, должны иметь среднее профессиональное или высшее техническое образование. Желательно иметь стаж работы (не менее 1 года). Сфера профессиональной деятельности – энергомашиностроительные предприятия.

Трудоёмкость обучения: 68 часов

Режим занятий: не более 8 часов в неделю, включая все виды аудиторной и внеаудиторной учебной работы.

Форма обучения: очная, очно-заочная, заочная. Очная форма – предполагает обязательное регулярное посещение аудиторных занятий (лекций, практических занятий, лабораторных работ) в дневное время (с частичным отрывом от производства). Очно-заочная форма – предполагает обязательное регулярное посещение аудиторных занятий после работы без отрыва от производства. Заочная форма – предполагает посещение аудиторных занятий в дневное время в сессию с частичным использованием дистанционных образовательных технологий: электронных Internet-ресурсов и единой информационно-образовательной среды MOODLE.

Приказ № 794 от 02.07.2015  
«Об открытии дополнительной профессиональной программы»

Целью реализации программы повышения квалификации является изучение теоретических положений для повышения срока службы изделий турбостроения: выбора их материала, диагностики износа, измерения твёрдости поверхности, установления межремонтных циклов в рамках контроля параметров технической эксплуатации гидравлических турбин, подготовки к производственно-технической деятельности по полученной ранее специальности с привлечением современных информационных технологий.

# Использование результатов работы в рамках ФПК для ОАО «Силовые машины»

- 1. Разработана Программа и Учебно-тематический план повышения квалификации **«Материалы для паровых турбин»**
- 2. Проведено обучение слушателей ОАО «Силовые машины» с 13.10.15 по 08.12.15.

**Приказ № 1066 от 28.09.2015**  
*«Об открытии дополнительной профессиональной программы»*



Целью реализации программы повышения квалификации является изучение теоретических положений для повышения срока службы изделий турбостроения: выбора их материала, диагностики износа, измерения твердости поверхности, установления межремонтных циклов в рамках контроля параметров технической эксплуатации гидравлических турбин, подготовки к производственно-технической деятельности по полученной ранее специальности с привлечением современных информационных технологий.

Категория слушателей: лица, желающие освоить программу повышения квалификации, должны иметь среднее профессиональное или высшее техническое образование. Желательно иметь стаж работы (не менее 1 года). Сфера профессиональной деятельности – энергомашиностроительные предприятия.

Трудоёмкость обучения: 68 часов

Режим занятий: не более 8 часов в неделю, включая все виды аудиторной и внеаудиторной учебной работы.

Форма обучения: очная, очно-заочная, заочная. Очная форма – предполагает обязательное регулярное посещение аудиторных занятий (лекций, практических занятий, лабораторных работ) в дневное время (с частичным отрывом от производства). Очно-заочная форма – предполагает обязательное регулярное посещение аудиторных занятий после работы без отрыва от производства. Заочная форма – предполагает посещение аудиторных занятий в дневное время в сессию с частичным использованием дистанционных образовательных технологий: электронных Internet-ресурсов и единой информационно-образовательной среды MOODLE.

**Целью реализации программы повышения квалификации является изучение теоретических положений для повышения срока службы изделий турбостроения: выбора их материала, диагностики износа, измерения твёрдости поверхности, установления межремонтных циклов в рамках контроля параметров технической эксплуатации паровых турбин, подготовки к производственно - технической деятельности по полученной ранее специальности с привлечением современных информационных технологий.**



**Спасибо  
за внимание**