

2026

ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики

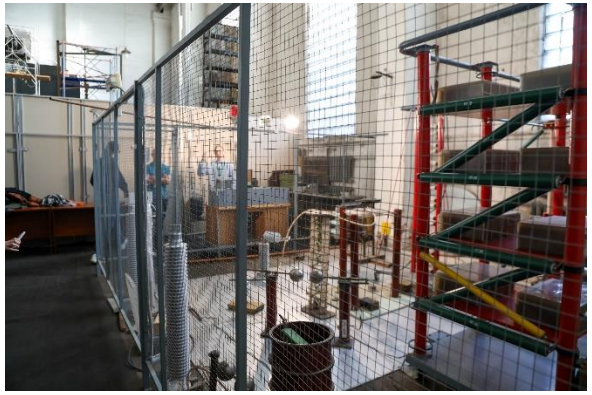
Наталья Константиновна Куракина
к.т.н.
доцент ВШВЭ

Физические механизмы возникновения локальных перегревов в высоковольтном оборудовании и методы их выявления на основе расчетного и экспериментального анализа

ВЫСШАЯ ШКОЛА ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики









5 бакалаврских образовательных программ

7 магистерских образовательных программ

3 специальности аспирантуры

55

ППС, среди них 37 чел. имеют докторскую или кандидатскую степень

40

аспирантов

400+

Студентов

30+

Индустриальных и академических партнеров

ВШВЭ: Направления исследований

ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики

1.Техника высоких напряжений и инженерная электрофизика:

1. Генерация сильных и сверхсильных импульсных магнитных полей
2. Вычислительная и экспериментальная физика систем высокого напряжения и газового разряда
3. Исследование и разработка систем электроизоляции (Научно-исследовательский центр)
4. Исследование импульсного сопротивления заземления при грозовых воздействиях
5. Мониторинг в реальном времени систем изоляции трансформаторов и кабелей
6. Физика и химия диэлектриков

2.Многокритериальная оптимизация энергосистем и электрооборудования:

1. Оптимизация режимов работы электроэнергетических систем
2. Численная оптимизация электрооборудования
3. Оптимизация автономных электроэнергетических систем на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ)

3.Автоматизированные системы диагностики и управления неустановившимися режимами энергосистем:

1. Релейная защита, автоматика и системы управления электрическими сетями
2. Электрические станции
3. Разработка методов, устройств и энергетического оборудования (гибкие технологии передачи переменного тока, FACTS) для управления режимами и противоаварийного управления

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВШВЭ В РАМКАХ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ

ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ соответствует целям следующих национальных проектов по обеспечению технологического лидерства :

- **Беспилотные авиационные системы**
- **Новые технологии сбережения здоровья**
- **Технологическое обеспечение продовольственной безопасности**
- **Новые материалы и химия**
- **Новые атомные и энергетические технологии**
- **Средства производства и автоматизации**
- **Развитие космической деятельности**
- **Транспортная мобильность**
- **Биоэкономика**

Важнейшие наукоемкие технологии в рамках национального проекта :

Критические технологии:
- Технологии создания высокоэффективных систем генерации, распределения и хранения энергии (в том числе атомной).

Сквозные технологии:
- Технологии создания новых материалов с заданными свойствами и эксплуатационными характеристиками.

Три ключевых научно-технических направления:

КНТН-1 «Системный цифровой инжиниринг»

КНТН-2 «Материалы, технологии, производство»

КНТН-3 «Искусственный интеллект для решения кросс-отраслевых задач»

Research group «Computational and Experimental Physics of High-Voltage Systems and Gas Discharge»





Obraztsov N.V - PhD, Assoc. Prof
Zhiligotov R.I. - PhD, Assoc. Prof
Kurakina N.K. - PhD, Assoc. Prof

Research directions

- Multiphysics Modeling of Electric Arc Systems and Low-Temperature Plasma
- Gas Dynamics of Discharge Processes in High-Voltage Switching Equipment
- Digital Design and Control of Power Converters for Plasma and Electromechanical Systems
- Computational Algorithms and Supercomputer Technologies in Electrophysics
- Heat and Mass Transfer in Electric Power Equipment
- Physico-Chemical Processes in Electric Arc and Electrotechnical Devices
- Digital Twins of Complex Electromechanical Systems

Projects

- Calculation of Thermal Conditions of a Generator Circuit Breakers.– 2026y
- Development of Behavioral Models for Stepper Motors under Various Operating Conditions.– 2026y
- Energy Dissipation in High-Current Arc Systems with Complex Gas-Dynamic Structures– 2023-25y
- Initial Reengineering, Design Documentation, and Test Bench Development for Synchronous Servomotors – 2023y
- Fundamentals of Heat Transfer Theory in Low-Temperature Plasma Flows. Interaction of the "Power Supply – Plasma Torch" System. Modeling and Experiment.– 2022-2023y

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ И НОРМАТИВНЫЙ ПОДТЕКСТ

ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики



СТРАТЕГИЧЕСКИЙ ТРЕНД

Активное внедрение компактных и надежных КРУЭ (110 кВ и выше) при реконструкции подстанций полностью соответствует Энергетической стратегии РФ до 2035 г. и Единой технической политике ПАО «Россети».

ПРОБЛЕМА НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ

Действующие нормы проектирования устарели и не учитывают реальную специфику эксплуатации современных КРУЭ и высоковольтных кабельных линий.

ПОДТВЕРЖДЕННЫЙ ОТРАСЛЕВОЙ ЗАПРОС

Прямой заказ ПАО «Россети» на НИОКР по созданию методик и ПО для расчета высокочастотных коммутационных процессов (ВЧП) свидетельствует о критическом пробеле в текущем методическом обеспечении.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Существует острая необходимость в разработке новых, адаптированных методов и средств защиты от ВЧП, локальных перегревов в высоковольтном оборудовании и методов их выявления на основе расчетного и экспериментального анализа для обеспечения надежности современного электросетевого комплекса.

ЭА ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики

01. Практический разбор аварийных инцидентов

АВАРИЙНЫЙ СЛУЧАЙ НА ПС 1150 КВ АЛТАЙ 26.02.2007

ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики

Операция: отключение короткого замыкания.



Последствия:

- разрушение фазы А колонкового элегазового выключателя В-1106





Причина:

Пробой изоляционных промежутков, длительное горение дуги (50 сек.) тока фазы А линии и взрыв дугогасительного устройства при возрастании давления в процессе отключения неповрежденной фазы линии, при неуспешном трехфазном автоматическом повторном включение.

АВАРИЙНЫЙ СЛУЧАЙ НА ПС 750 КВ НОВОБРЯНСКАЯ 13.07.2011

ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики

Операция: отключение линии



Последствия:

При осмотре элегазового выключателя выявлено:

- • Полностью разрушены все четыре камеры фазы «А»;
- • Разлетающимися осколками фарфора повреждено рядом стоящее оборудование;
- • В двух разобранных камерах фазы «С» внутри расширения сопла обнаружены следы сажи, что подтверждает факт длительного нерасчетного горения дуги.

Причина:

Длительное горение дуги (28 секунд) в фазе «А», возникшей вследствие сверхнормативного (нерасчётного) воздействия апериодической составляющей тока ненагруженной ВЛ 750 кВ Курская АЭС – Новобрянская с подключенными по ее концам двумя шунтирующими реакторами при ложном срабатывании НДЗ и отключении В-4 через 75 мс после включения.

АВАРИЙНЫЙ СЛУЧАЙ НА ПС 500 КВ ШАХТЫ 04.11.2014 / 07.02.2015

ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики

Операция: включение / отключение



Последствия:

- Неуспешное повторное включение с возникновением апериодической составляющей тока, длительное горение дуги. Выключатель успешно отключился
- После успешного полнофазного отключения пробой фазы А с длительным горением дуги
- прогорание поверхности рабочего контакта обеих дугогасительных камер выключателя
- разрушение фарфоровых покрышек



Причина:

Отключение выключателя, сопровождающееся длительным горением дуги, привело к повреждениям внутри дугогасительной камеры выключателя (как изоляционных частей, так и контактной группы), что стало предпосылкой технологического нарушения даже при отключении токов, не превышающих номинальные значения.

АВАРИЙНЫЙ СЛУЧАЙ НА ПС 500 КВ ТИХОРЕЦК 08.09.2023

Операция: плановые переключения при комплексном опробовании в ячейке №19.



Последствия:

- возгорание кабельных связей между аппаратным шкафом и КРУЭ
- пробой изоляции выводов вторичных обмоток ТН
- повреждение в клеммной коробке трансформатора напряжения
- первичная изоляция КРУЭ – без повреждений

Причина:

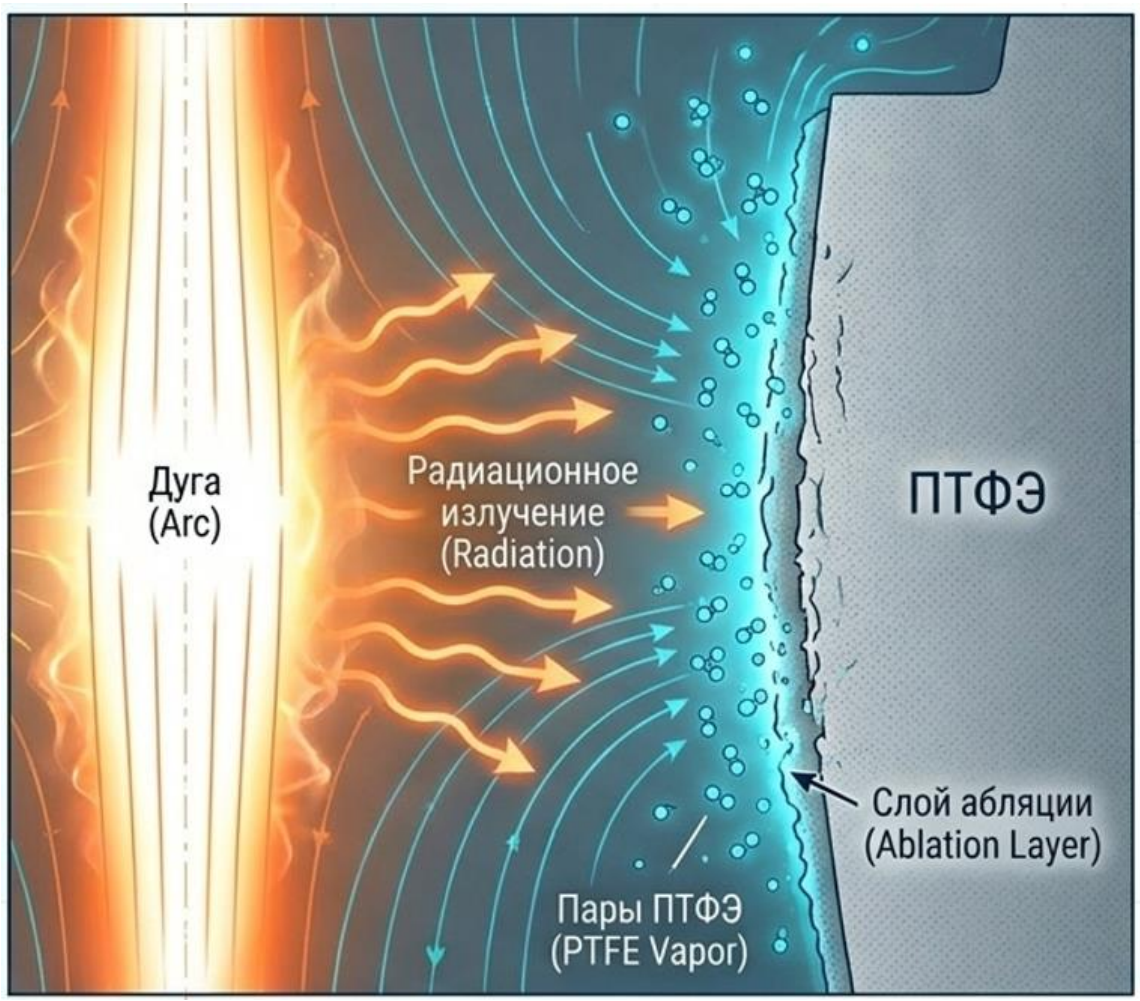
Распространение высокочастотного импульса по главной токоведущей цепи и его прохождение во вторичные цепи и далее – в кабели вторичных соединений.

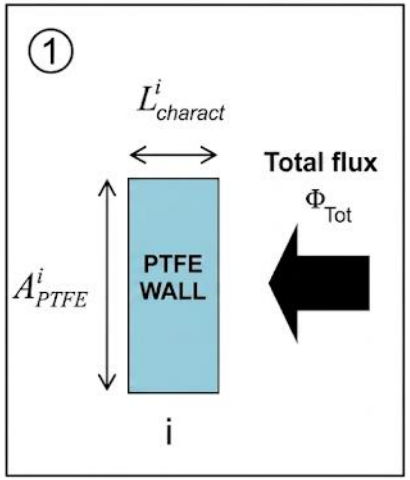


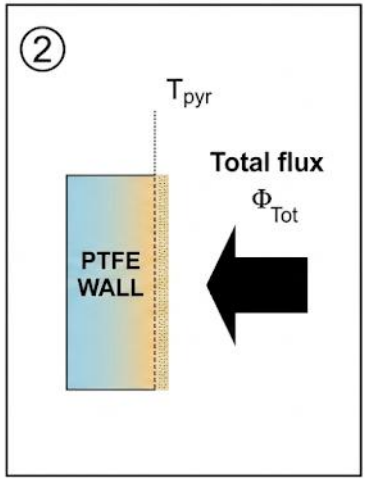
ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики

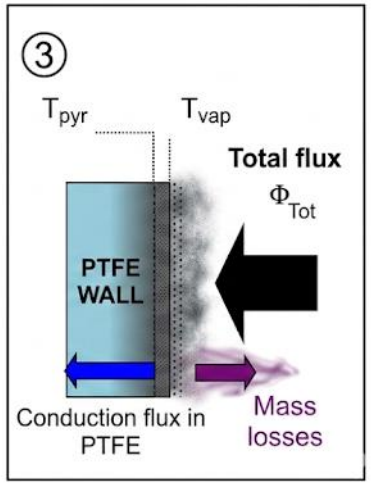
02. Физика процессов термической деструкции, дуговых явлений и ВЧП

ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СИЛЬНОТОЧНОЙ ФАЗЕ ДУГИ





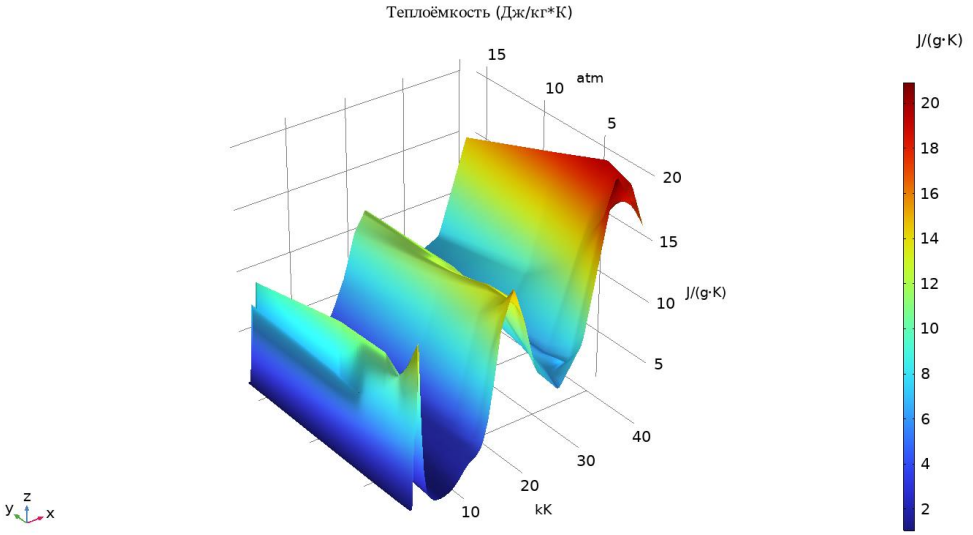


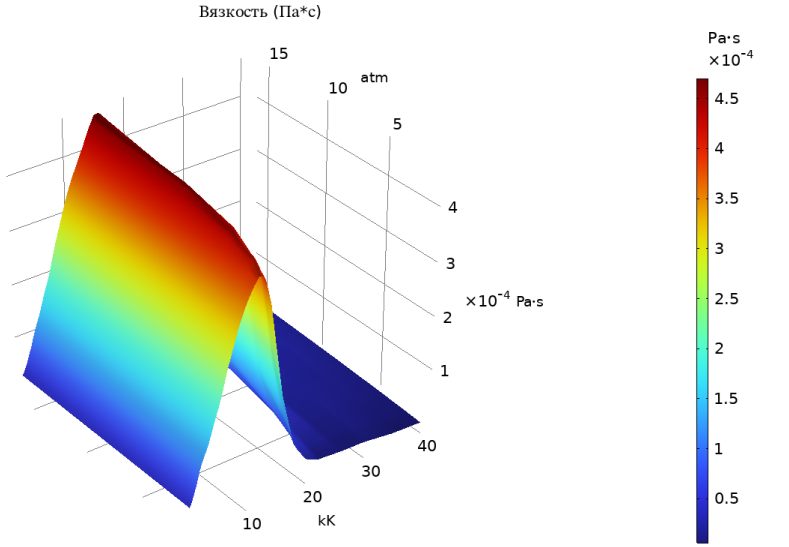


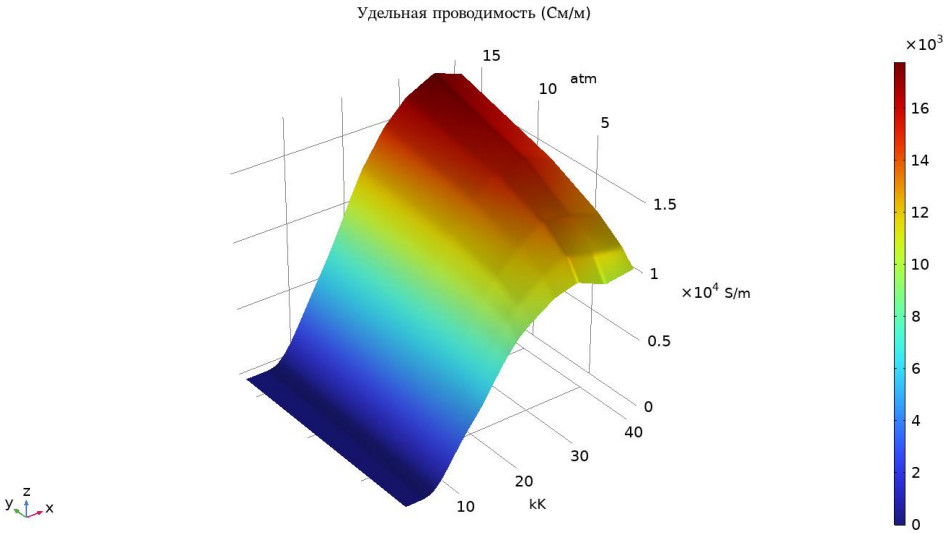
Радиационный энергообмен при температурах 18 000–20 000 К, где до 80% энергии передается излучением, вызывая термический кризис течения и абляцию стенок сопел, меняя геометрию ДУ.

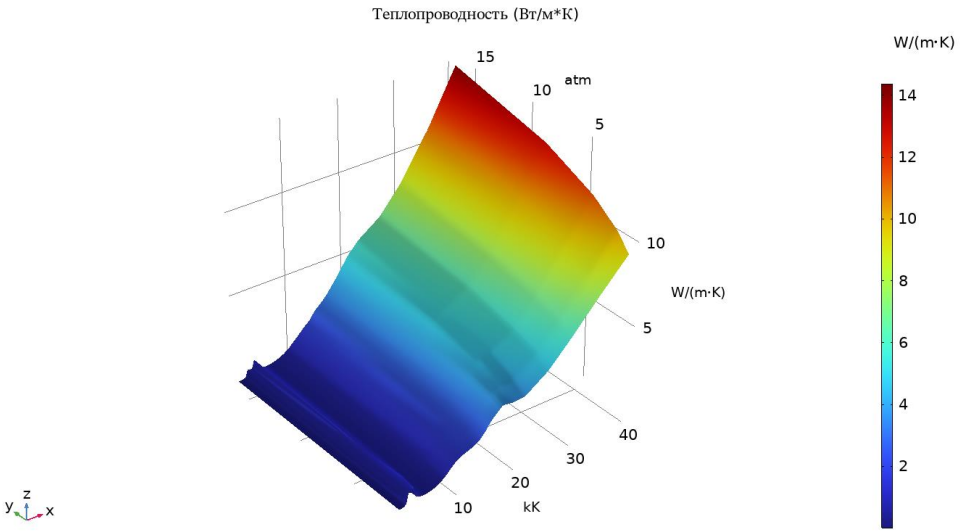
НЕЛИНЕЙНОСТЬ СВОЙСТВ ИЗОЛЯЦИОННОЙ СРЕДЫ

ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики









ВЛИЯНИЕ ПРОДУКТОВ ЭРОЗИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики



Fig.4. Tungsten-electrode surface after 9 pulses (left) and pulse+follow current (right) waveforms.

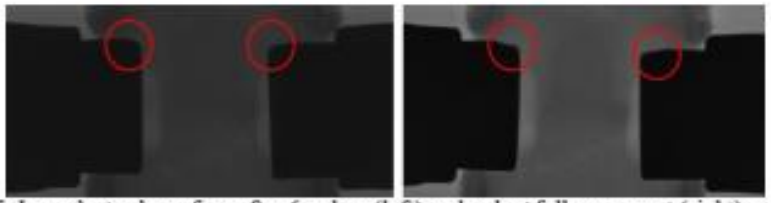


Fig.5. Iron-electrode surface after 6 pulses (left) and pulse+follow current (right) waveforms.

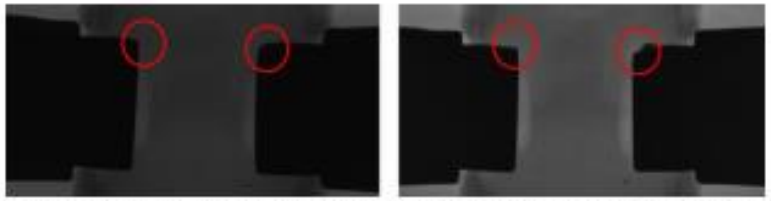


Fig.6. Copper-electrode surface after 6 pulses (left) and pulse+follow current (right) waveforms.

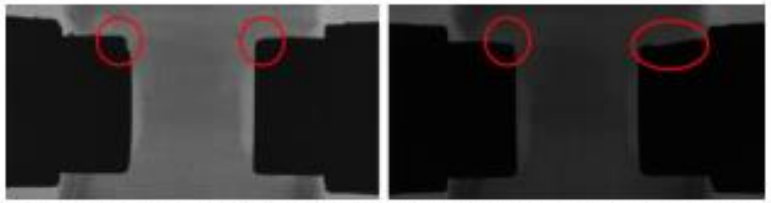
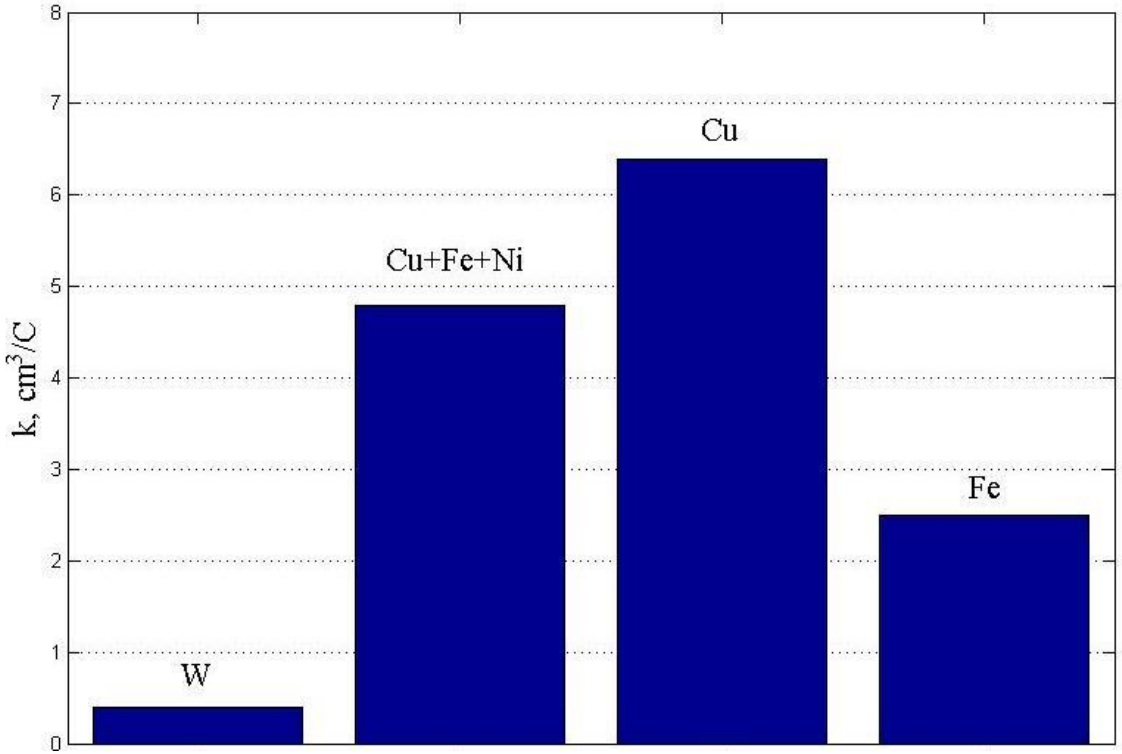
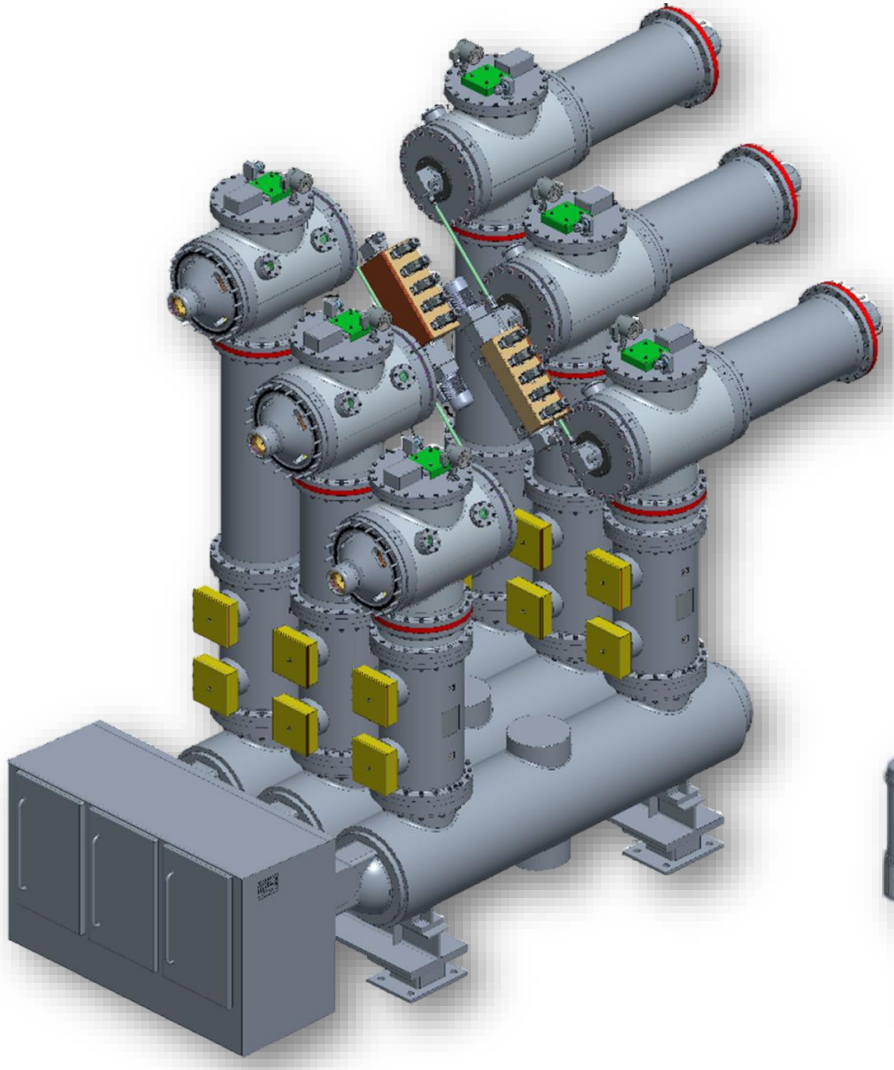


Fig.7. Copper with nickel+iron coating electrode surface after 4 pulses (left) and pulse+follow current (right) waveforms

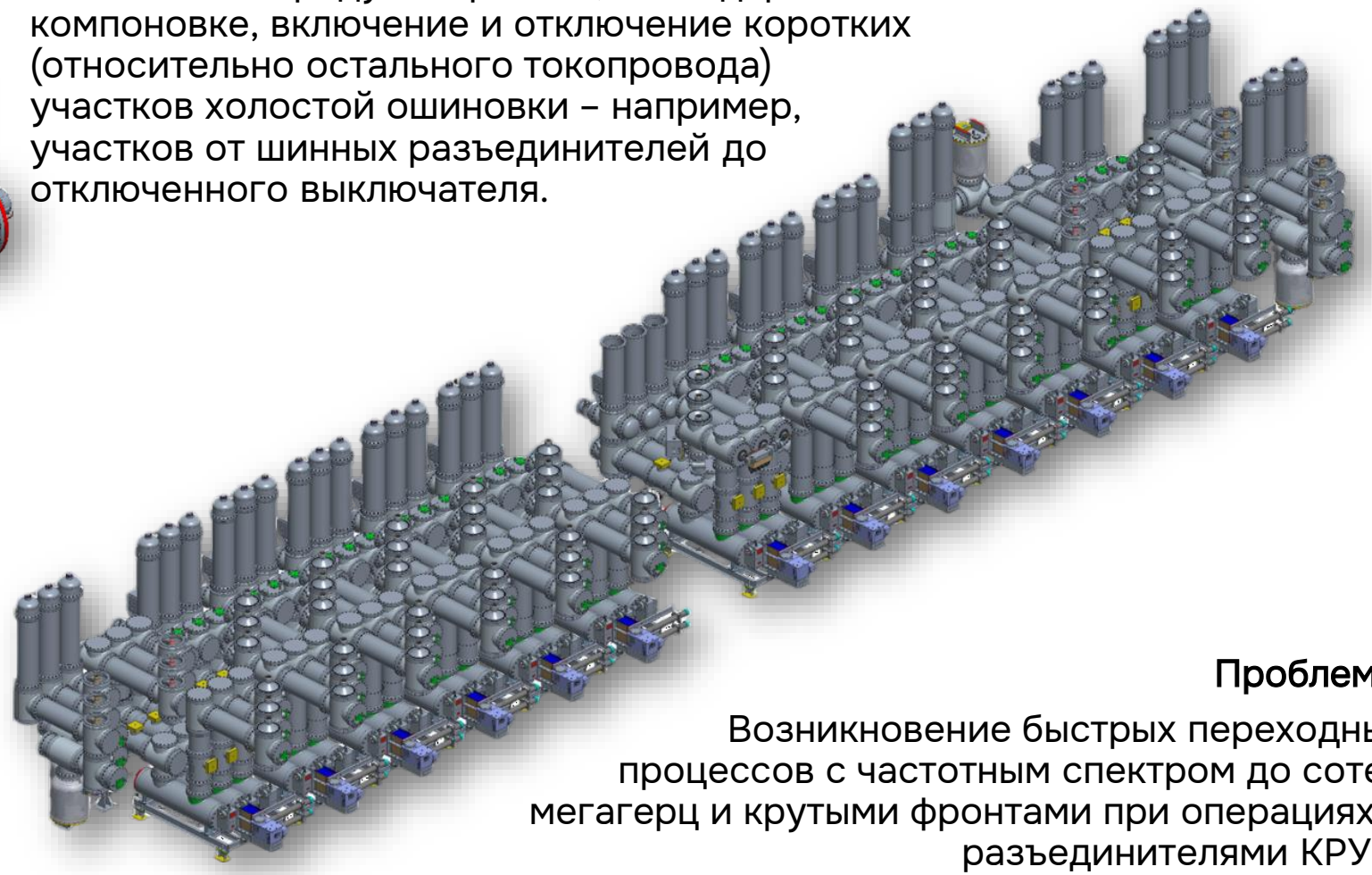
Попадание паров меди от электрических контактов в рабочий объем увеличивает концентрацию свободных электронов и замедляет деионизацию



ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ



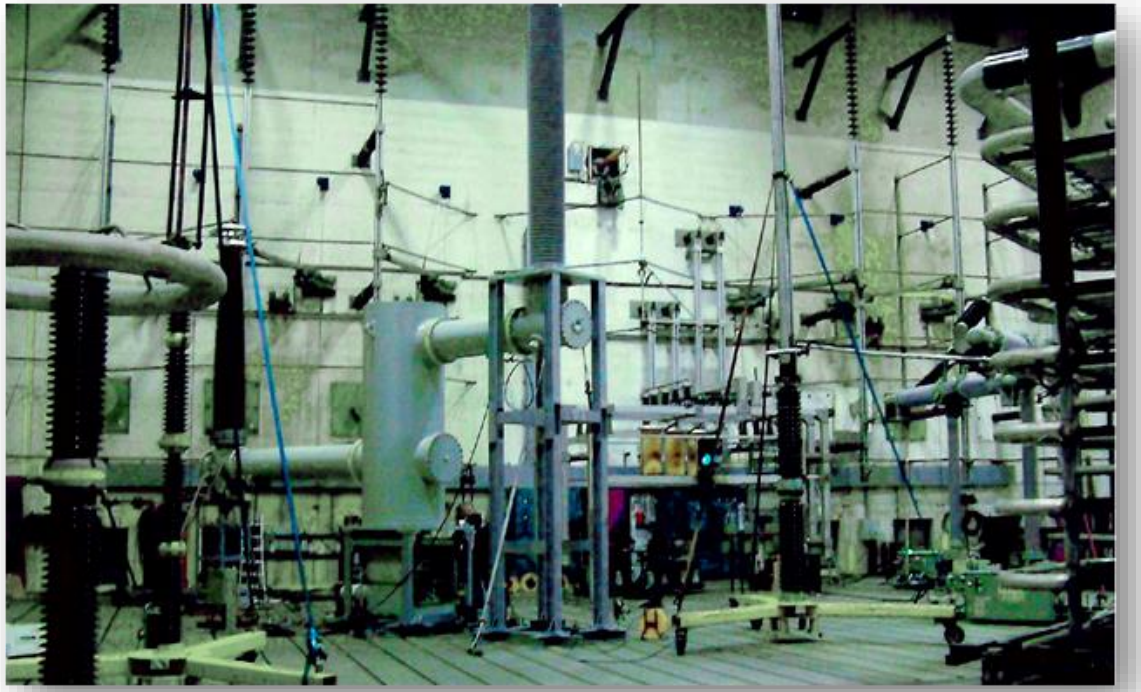
Любое КРУЭ предусматривает, благодаря своей компоновке, включение и отключение коротких (относительно остального токопровода) участков холостой ошиновки – например, участков от шинных разъединителей до отключенного выключателя.

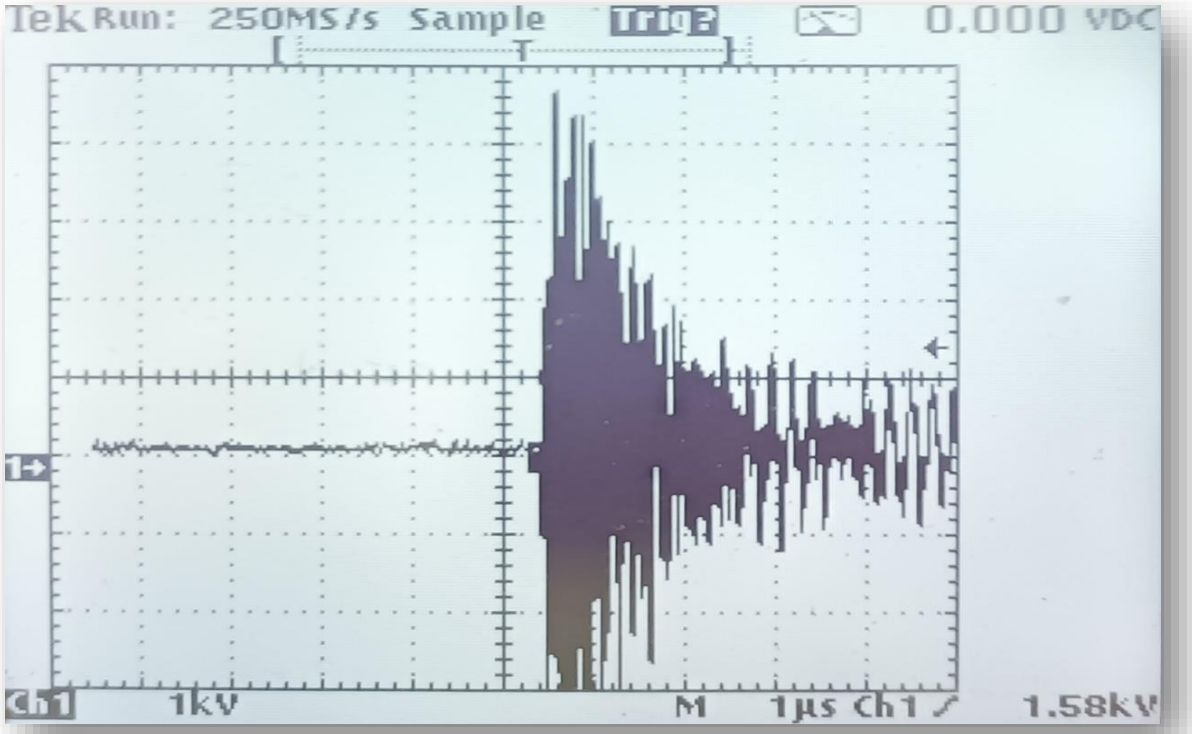


Проблема:

Возникновение быстрых переходных процессов с частотным спектром до сотен мегагерц и крутыми фронтами при операциях с разъединителями КРУЭ.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ





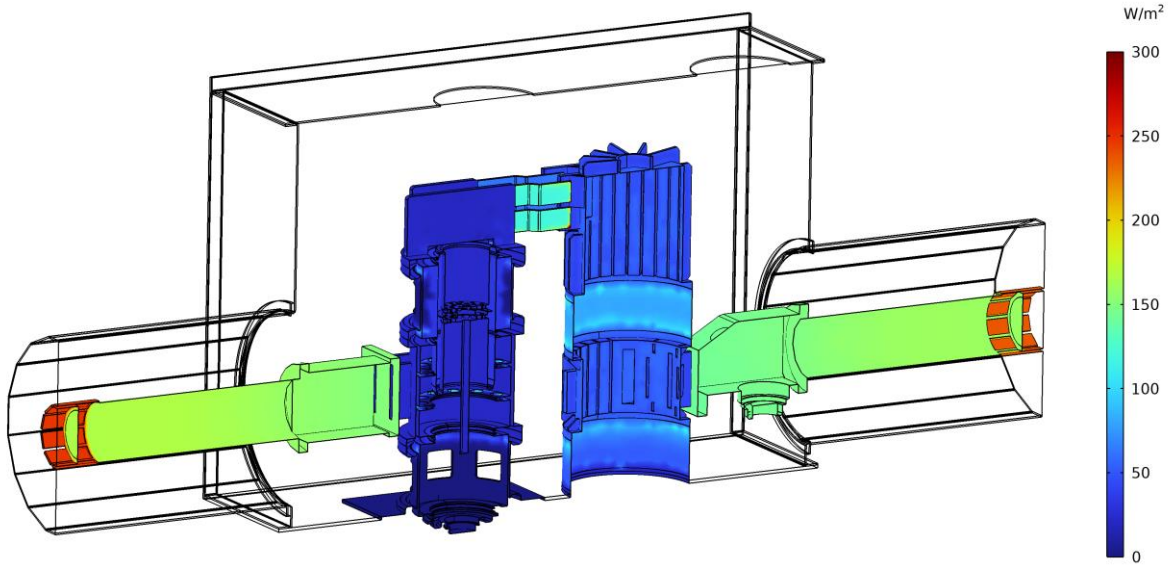
Форм-фактор КРУЭ повышает требования к ЭМС и специфической проблемой при эксплуатации являются высокочастотные перенапряжения (ВЧП/VTFO) при коммутациях разъединителями

ВЧП опасны не только для основной изоляции КРУЭ, но и для вторичных цепей, микропроцессорных средств РЗА и АСУ ТП.

ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики

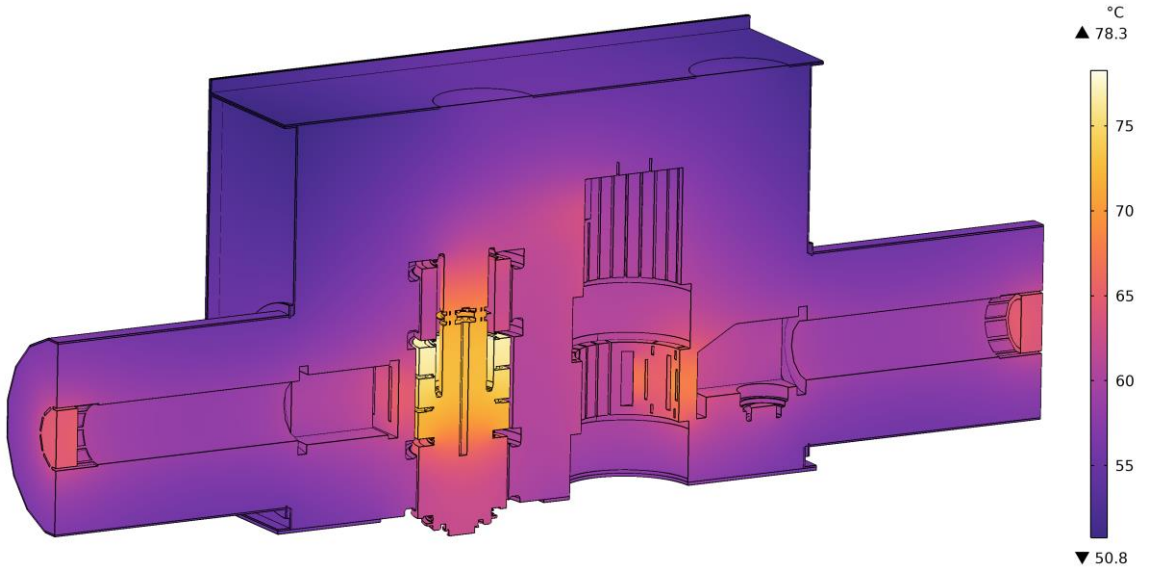
03. Расчетно-теоретические методы анализа

ТЕПЛООБМЕН В ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ

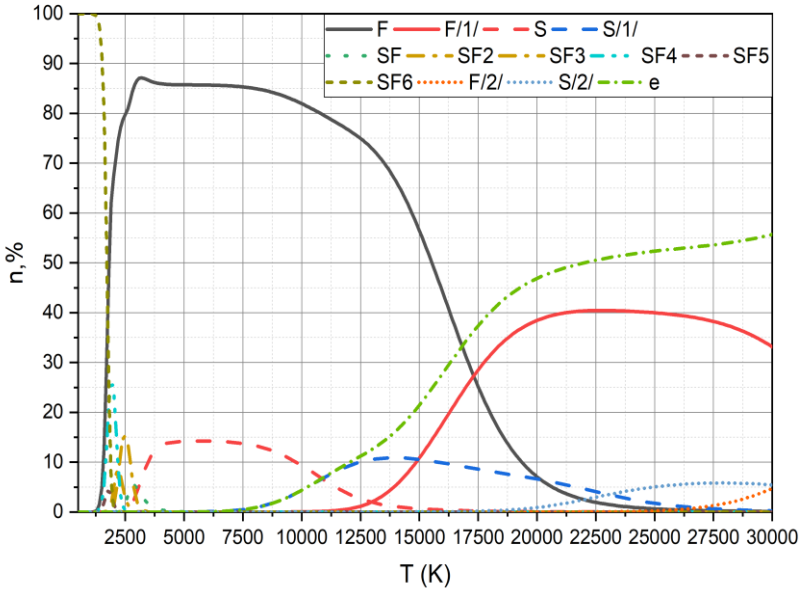


Расчётные тепловые потоки

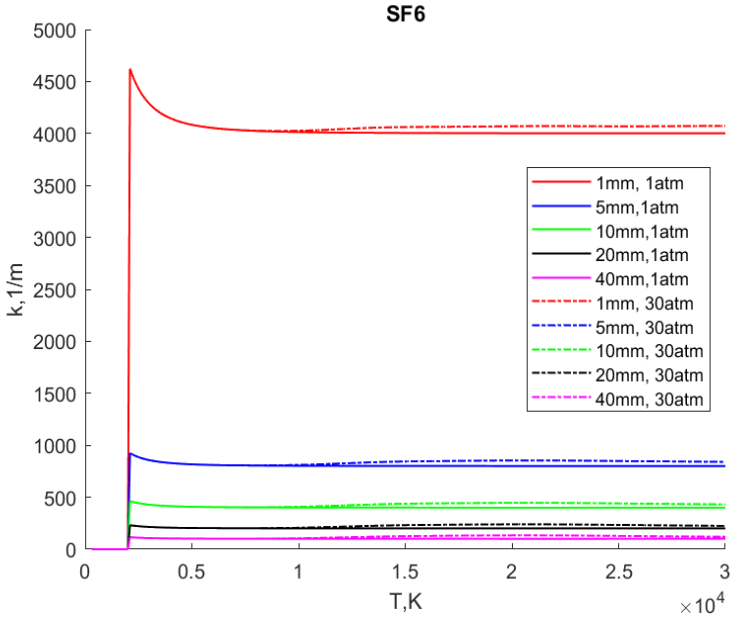
Тепловая картина ГРУ



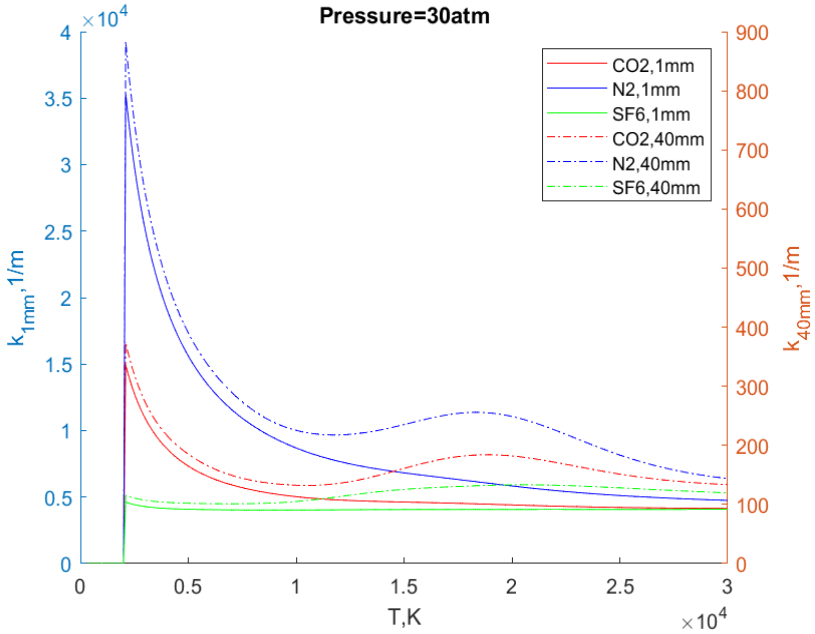
ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДАВЛЕНИЯ И РАДИУСА ДУГИ НА СВОЙСТВА СРЕДЫ



Зависимость концентрации компонентов от Т для элегаза, только основные компоненты, концентрация которых превышает 5% (давление 1 атм).



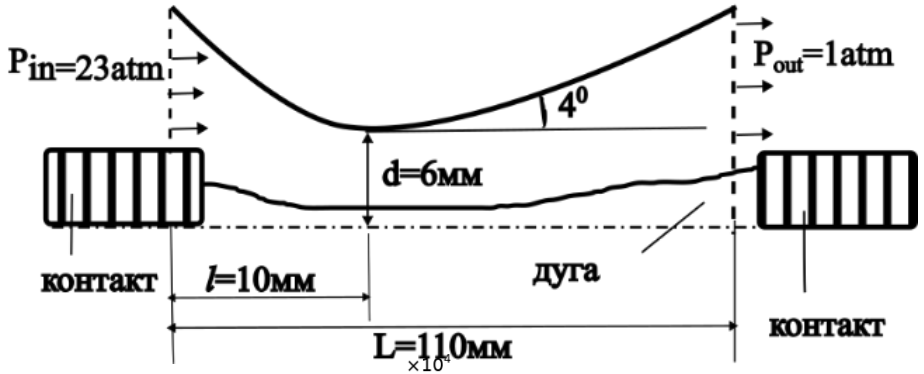
Зависимость коэффициента поглощения от температуры для различных радиусов дуги и давлений

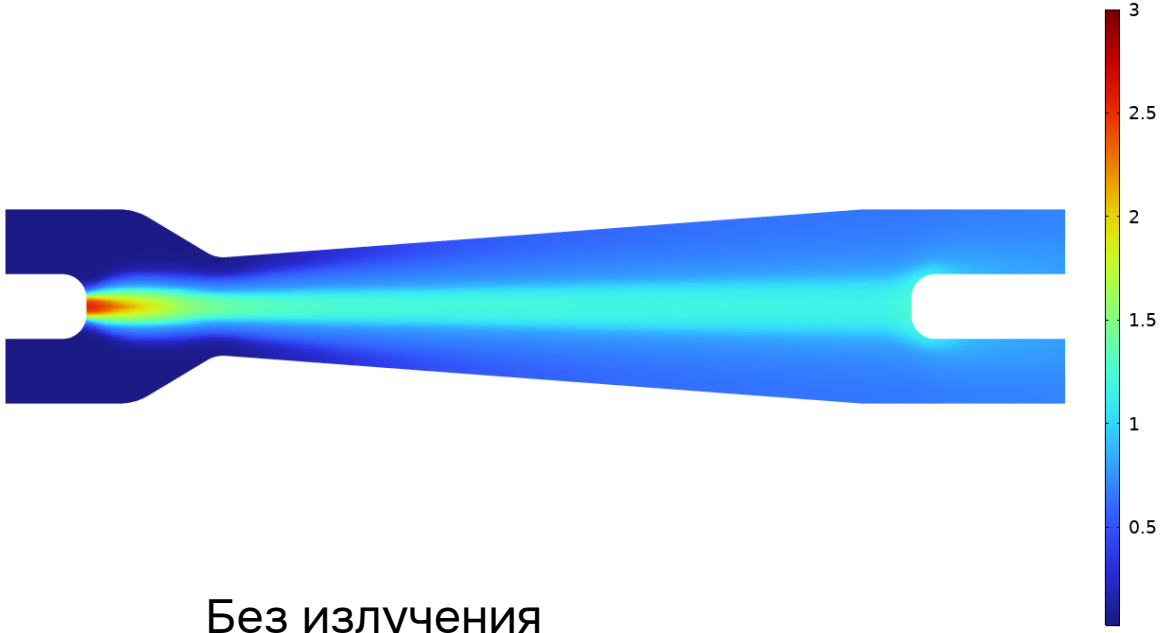


Зависимость коэффициента поглощения от температуры для дуг радиусом 1мм (левая ось ординат) и 40мм (правая ось ординат) при давлении 30атм

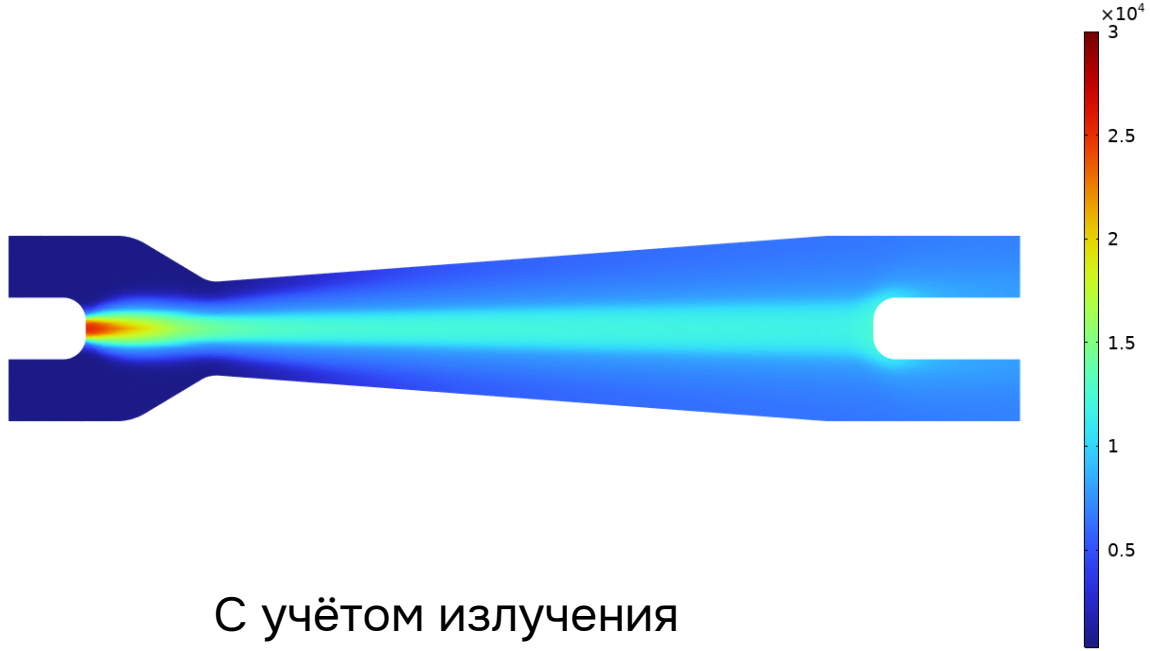
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ СТОЛБА ДУГИ БЕЗ/С УЧЕТОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики





Без излучения

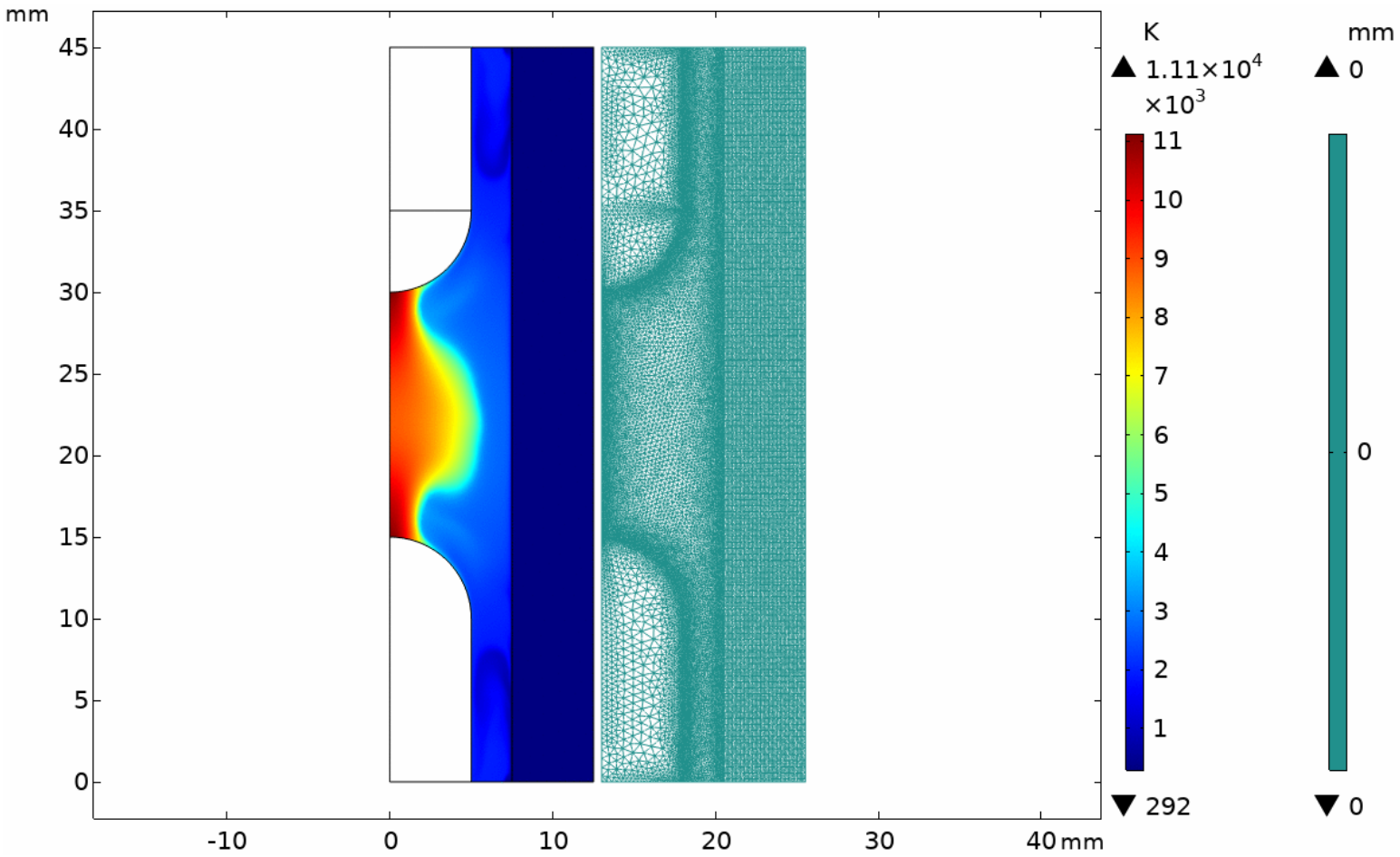


С учётом излучения

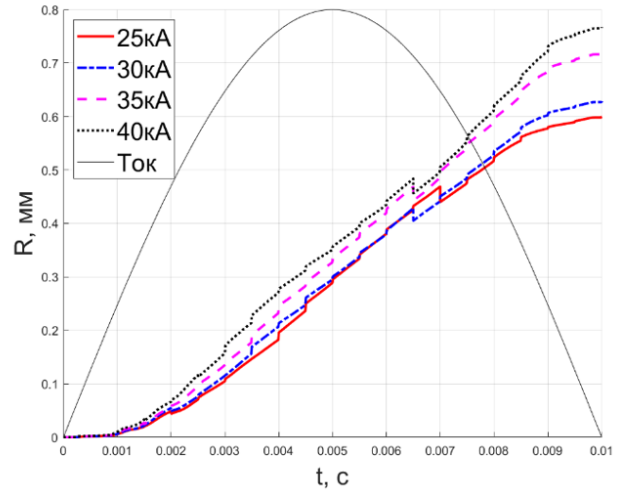
ТЕРМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СИЛЬНОТОЧНОЙ ФАЗЕ ДУГИ

ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики

Динамика T и деформация стенки



Влияние тока отключение на деформацию сопла

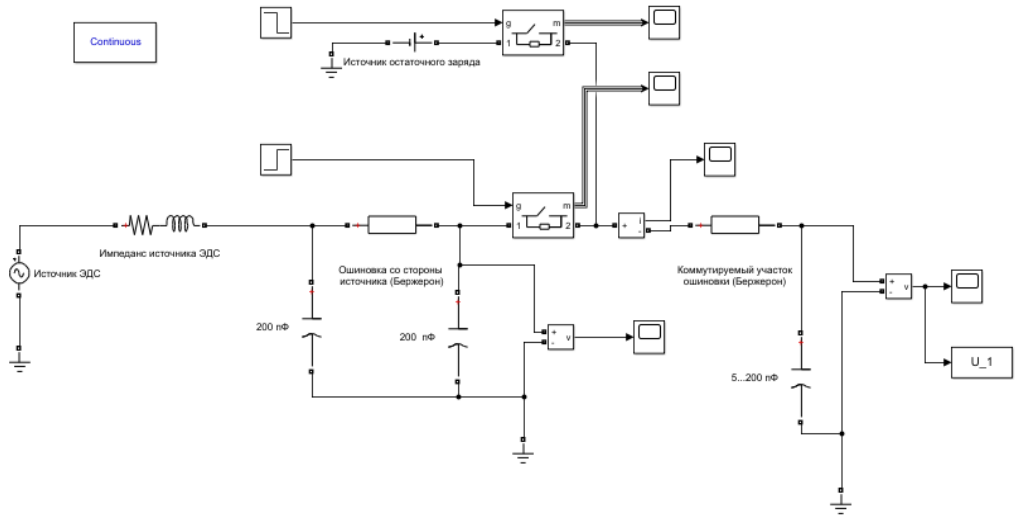


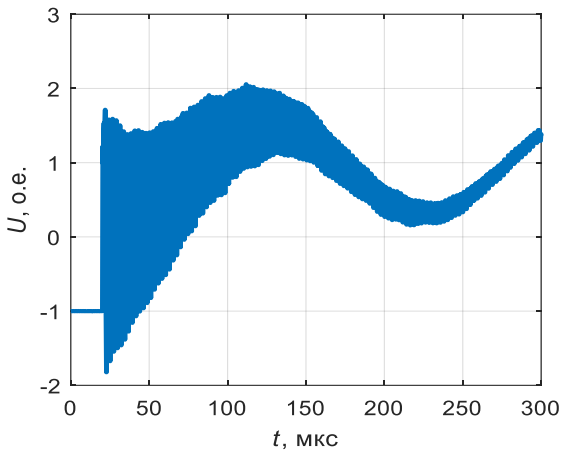


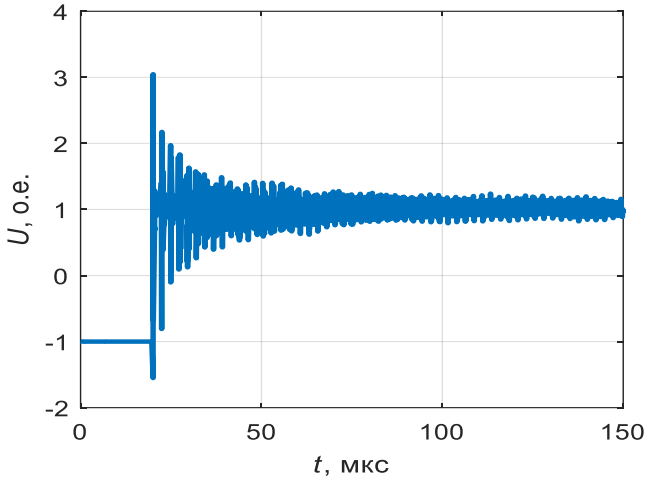
ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ КОММУТАЦИОННЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Высшая школа высоковольтной энергетики

Для исследования процессов, протекающего в КРУЭ, разработаны модели в MATLAB/Simulink







Модели позволяют учесть:

- распределенный характер параметров
- конечную скорость распространения волн
- импедансные неоднородности токопроводов КРУЭ

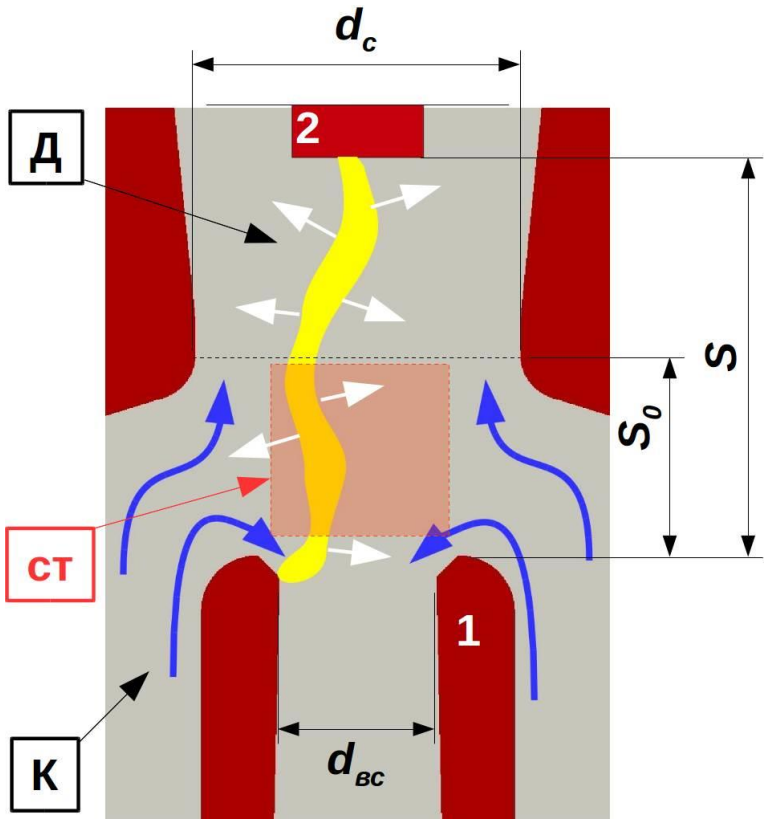
По результатам расчета разработан комплекс мероприятий:

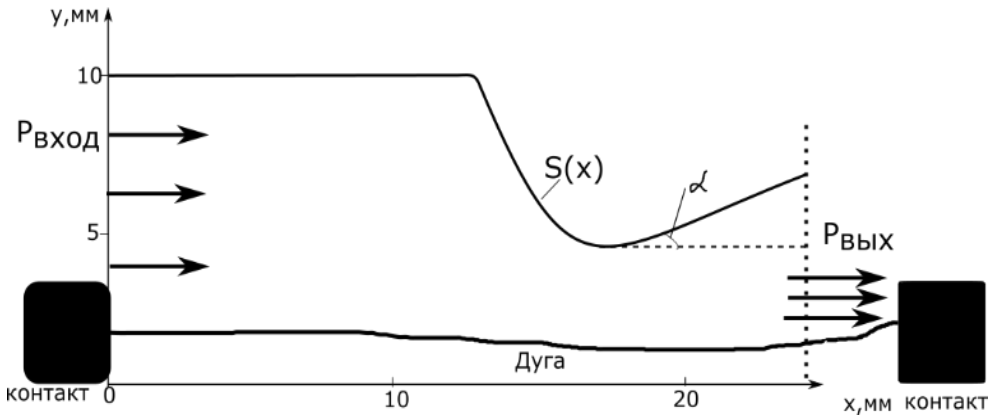
- установка быстродействующих ОПН во вторичные цепи ТН
- восстановление непрерывности экранирования кабельных трасс
- повышение качества соединений системы заземления
- применение демпфирующих резистивных элементов

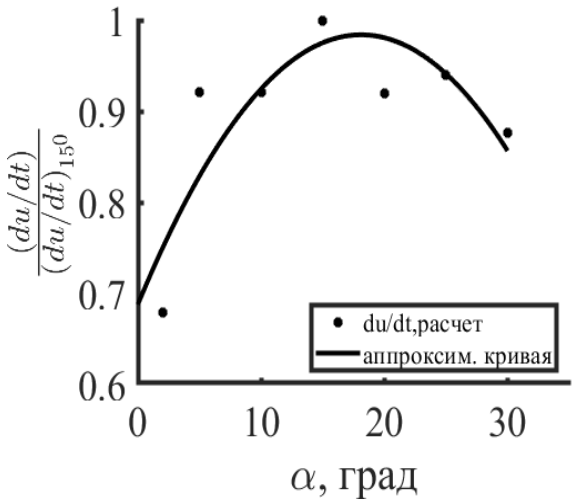
ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики

04. Эффективные защитные решения

ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА ПОЛУРАСТВОРА ДИФФУЗОРА ДУ



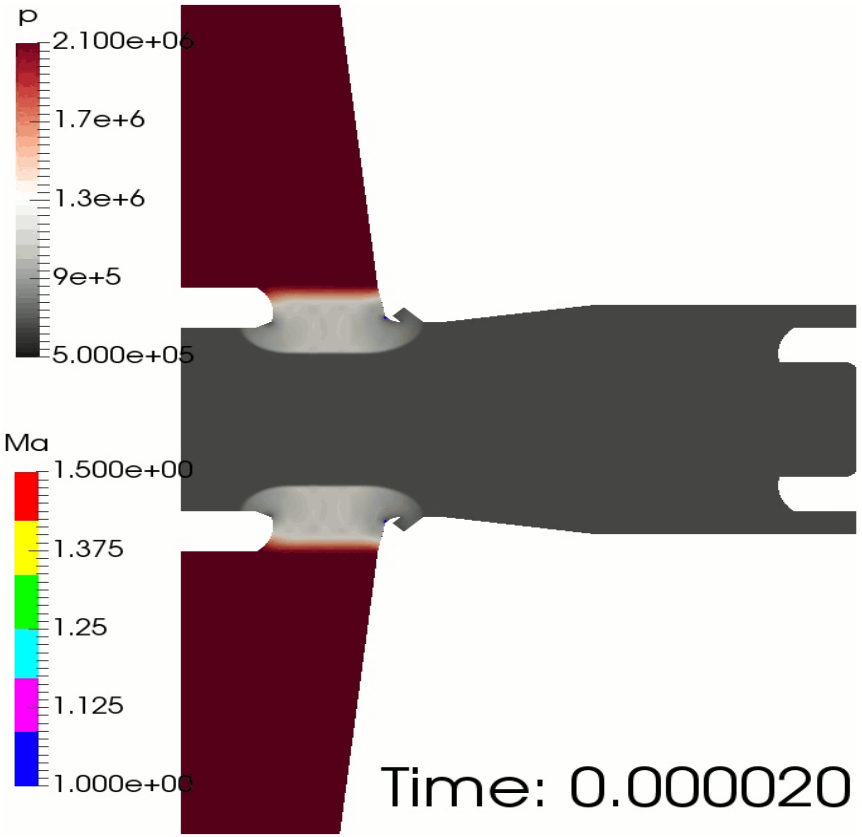


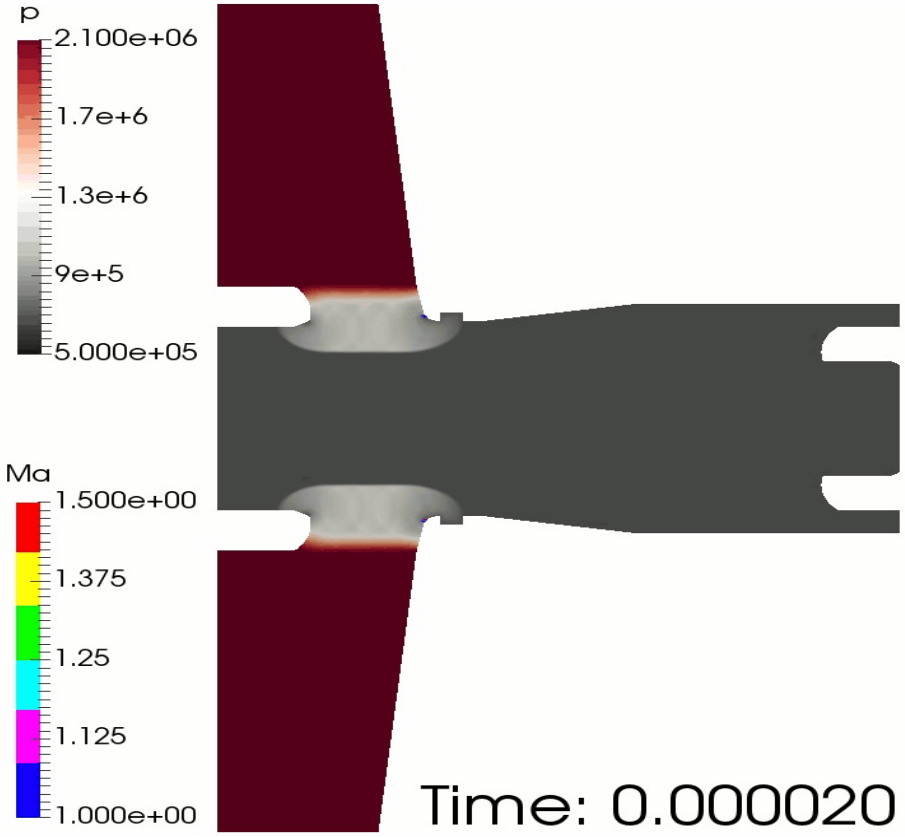


- Область вверх по потоку (К)
- Область горловины сопла
- Область вниз по потоку (Д)

СИНХРОННАЯ ГАЗОВАЯ ИНЖЕКЦИЯ: ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

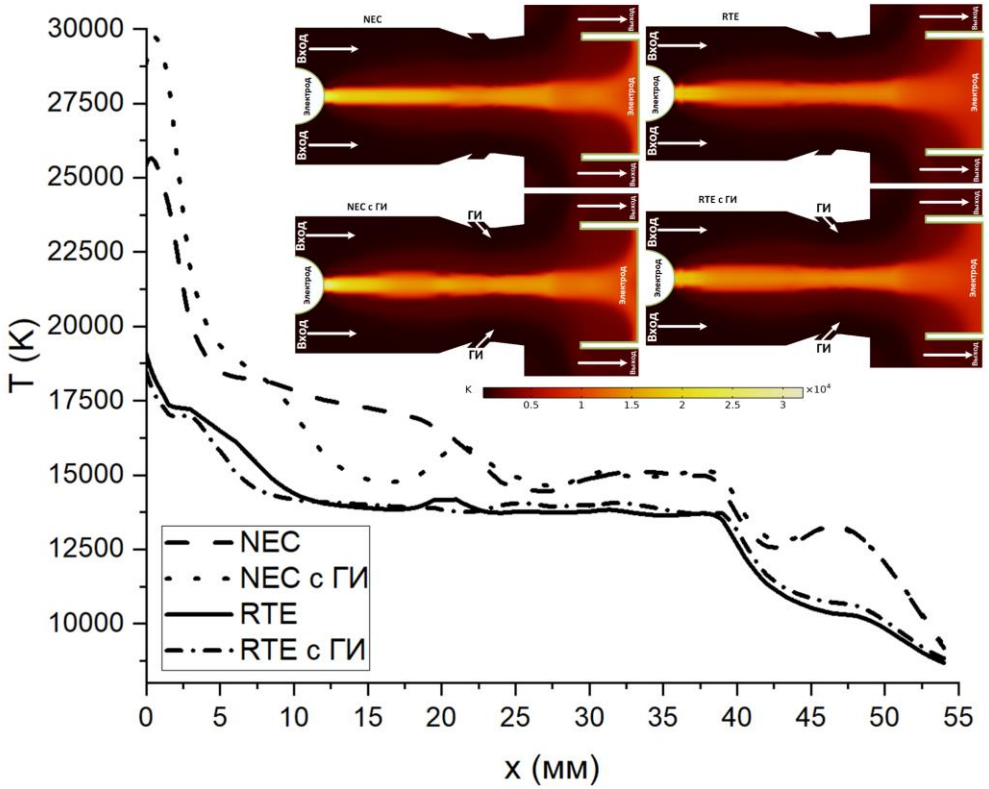
ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики

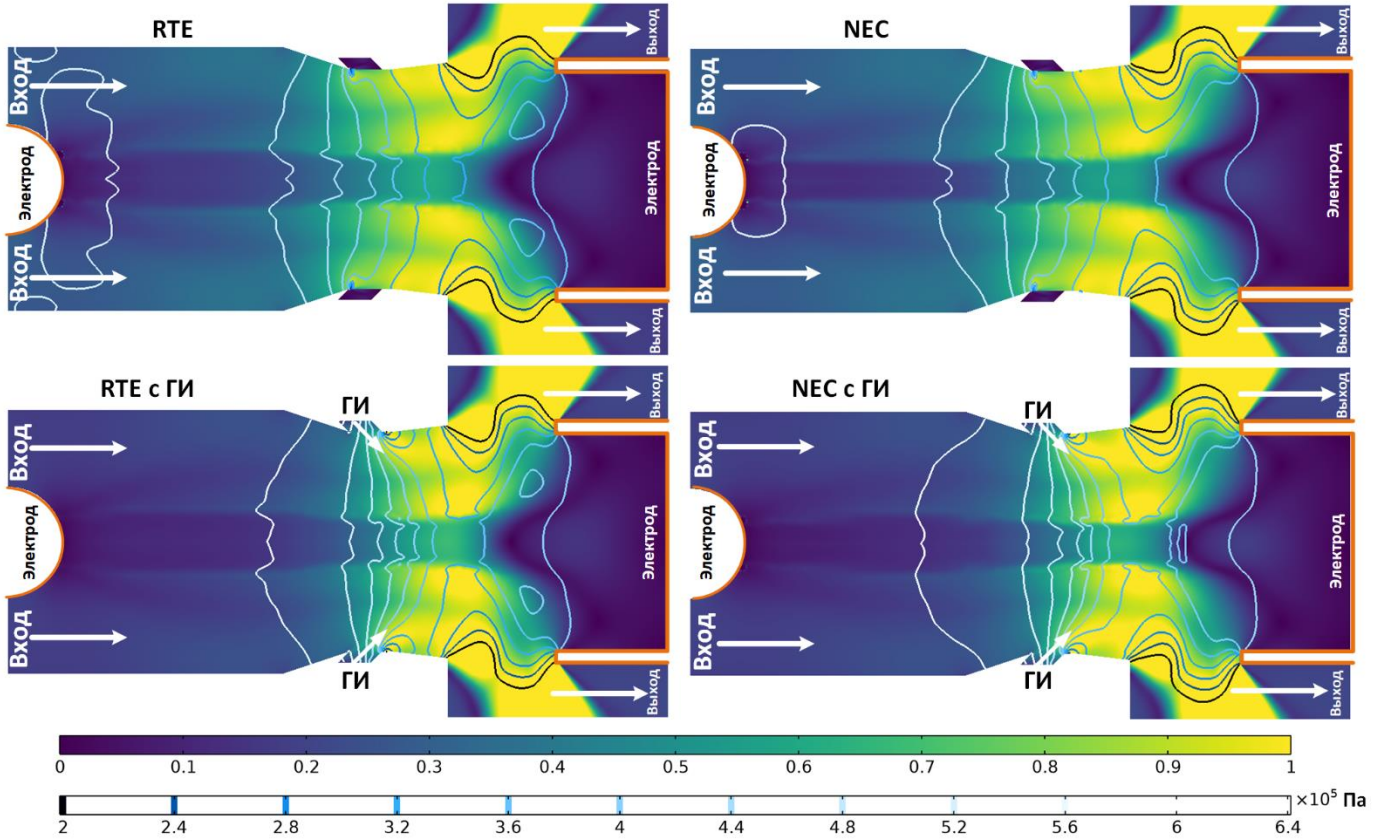




АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ СИЛЬНОТОЧНОЙ ФАЗЫ ДУГИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

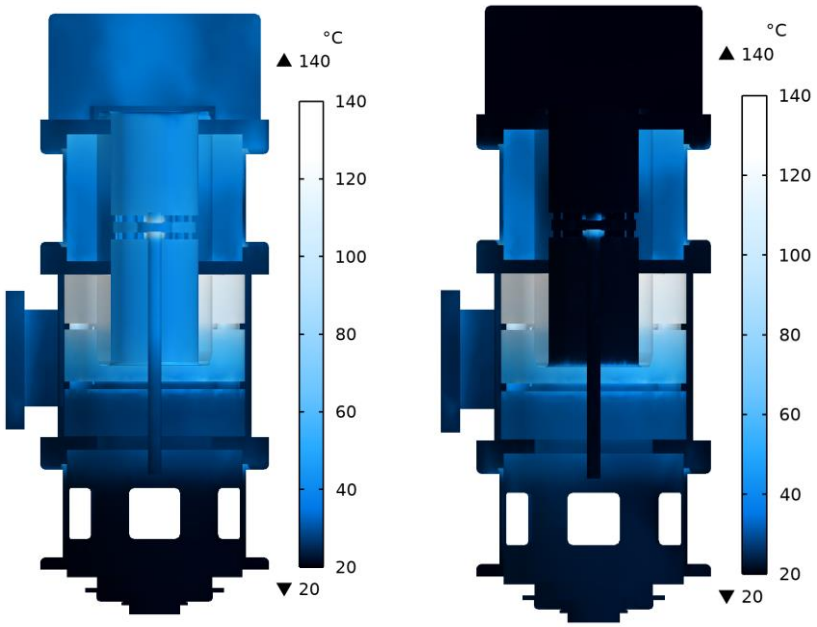
ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики



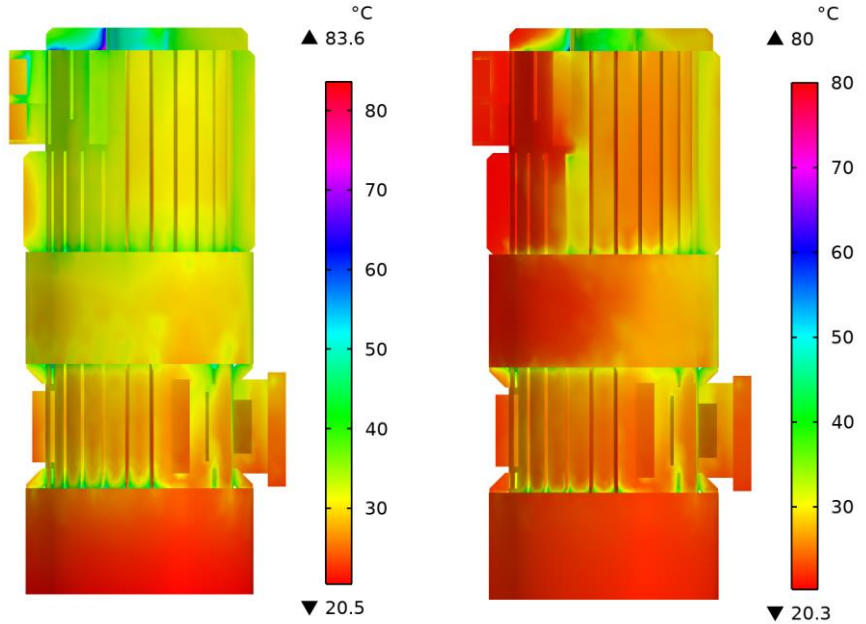


ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ МЕСТ ЛОКАЛЬНОГО ПЕРЕГРЕВА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

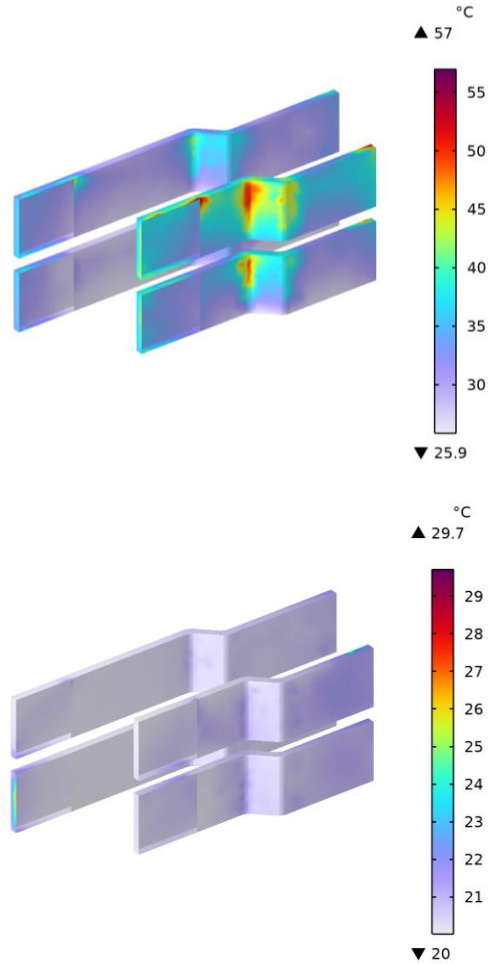
ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики



Поле температур разъединителя



Поле температур ВВГ-20



Поле температур шин

Практический результат:

Использование численного эксперимента позволяет устранить места локального перегрева различного электрооборудования

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЧП

ЭА ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики

Экспериментально подтверждено:

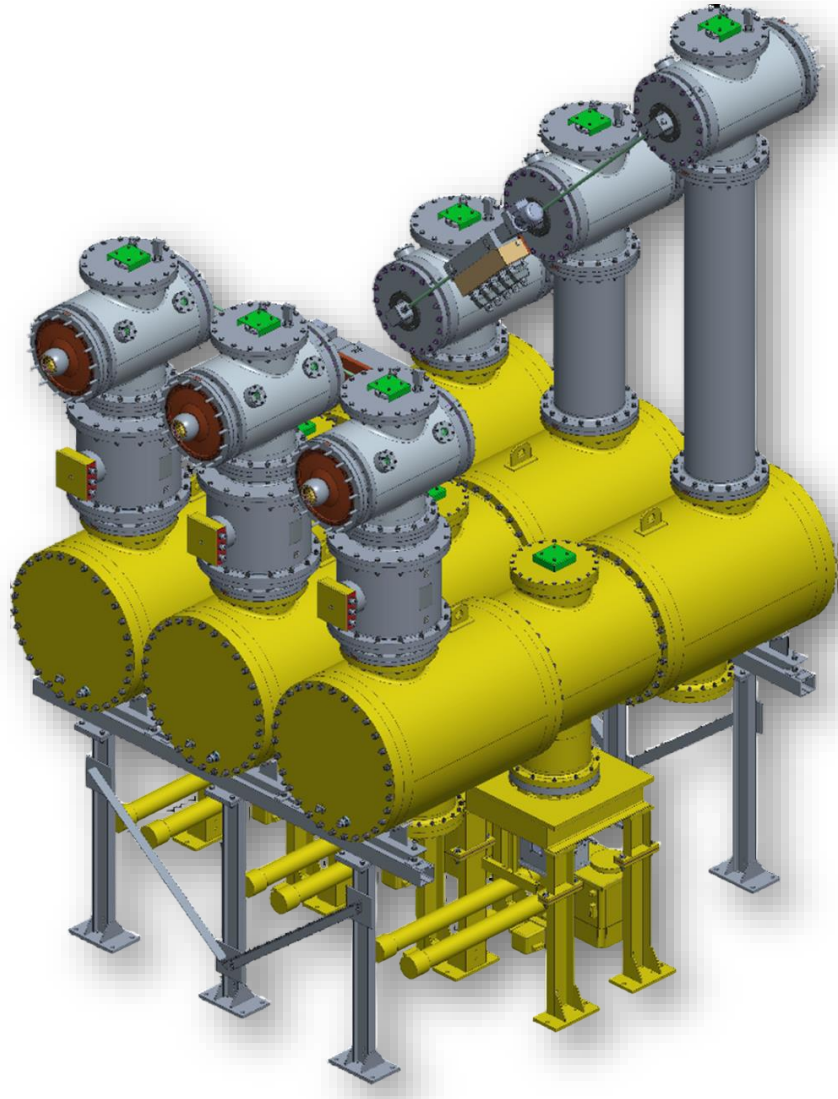
- применение ОПН и демпфирующих элементов снижает ВЧП с 5,5 до 0,4 кВ
- резистор 240 Ом в межконтактном промежутке обеспечивает безопасный уровень перенапряжений, защищая не только вторичную, но и первичную изоляцию

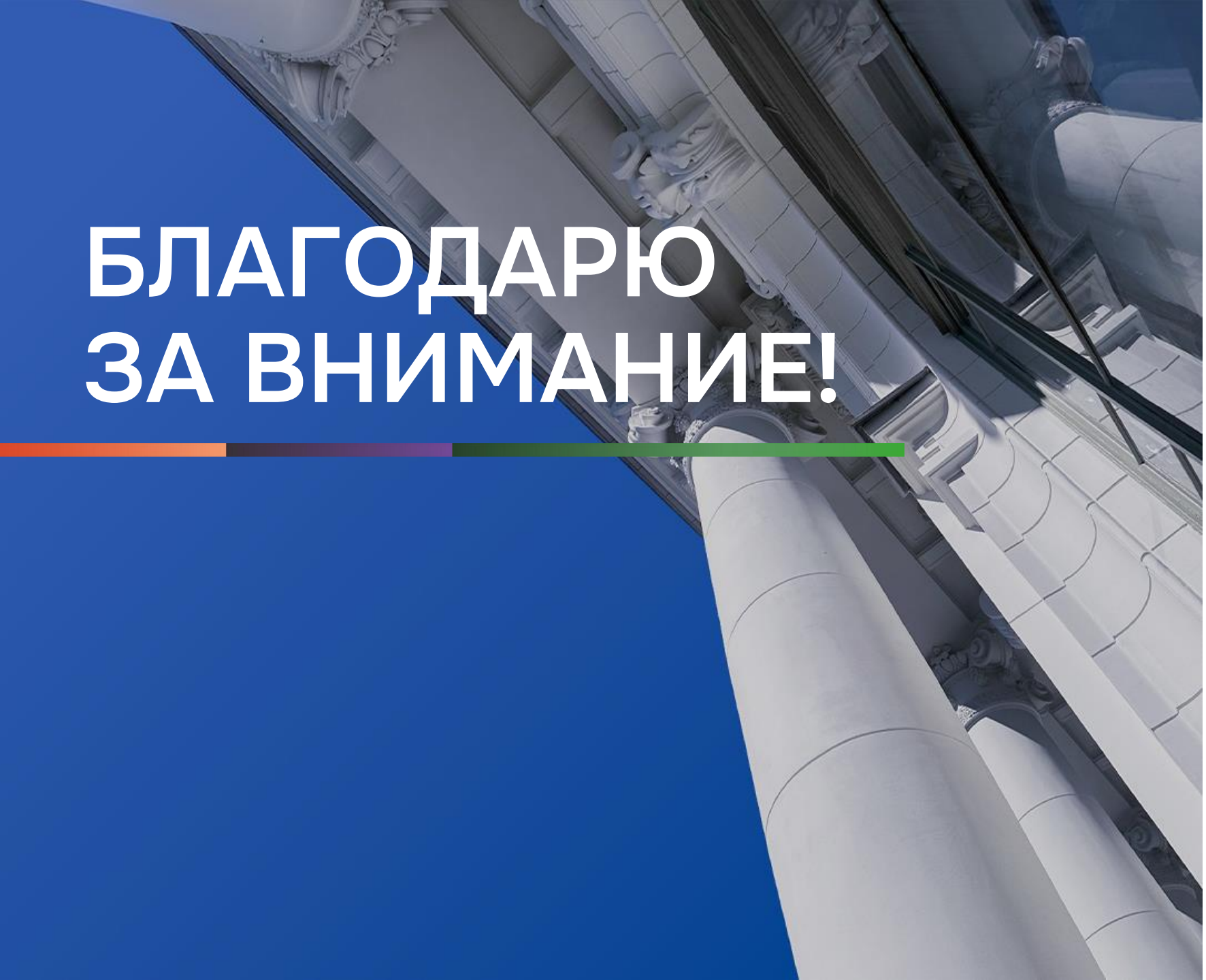
Практический результат:

- создание КРУЭ со встроенными средствами подавления ВЧП, потенциально не требующего строгого выполнения требований СТО в части организации технологически сложного контура заземления, что может быть использовано при строительстве подстанций на неблагоприятных грунтах.

Дальнейшее развитие:

- совершенствование встроенных устройств, применение в КРУЭ более высоких классов напряжения
- измерительные комплексы для регистрации амплитуды и частоты ВЧ-импульсов в мегагерцовом диапазоне





БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!

ПОЛИТЕХ | ИЭ Высшая школа высоковольтной энергетики

Наталья Константиновна Куракина
к.т.н.
доцент ВШВЭ

natkur@yandex.ru
тел. +7-921-8749983