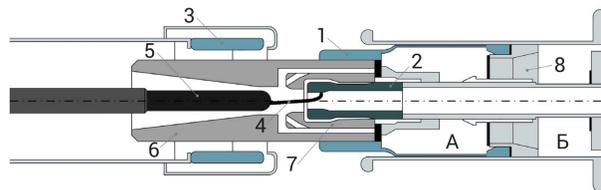


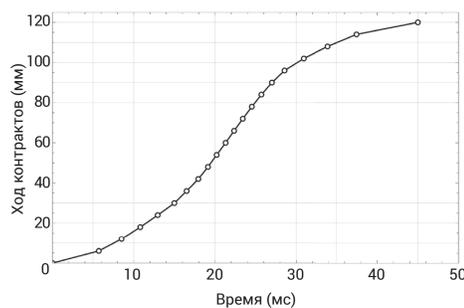
К вопросу разработки модели дуги отключения на основе расчета мультифизических процессов при коммутации элегазовых выключателей

Цель работы — создание адаптивной расчетной модели с учетом движения подвижных частей дугогасительного устройства (ДУ) на основе кривой хода контактов, позволяющей в дальнейшем сравнивать различные подходы к описанию взаимодействия дуги отключения с обдувающим ее потоком элегаза.

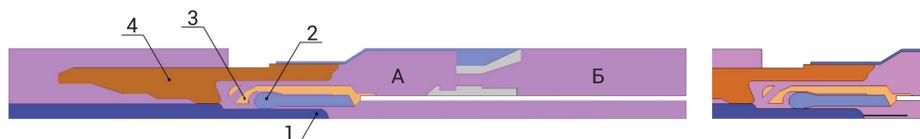


Объект исследования — ВЭБ-110: 1 — главный подвижный контакт; 2 — подвижный дугогасительный контакт; 3 — главный неподвижный контакт; 4 — электрическая дуга; 5 — неподвижный дугогасительный контакт; 6 — большое сопло; 7 — малое сопло; 8 — поршень; А — надпоршневая область; Б — подпоршневая область

В качестве метода исследования используется численное моделирование методом конечных элементов на основе подвижной сетки — Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE), реализуемое в пакете COMSOL Multiphysics 6.0.



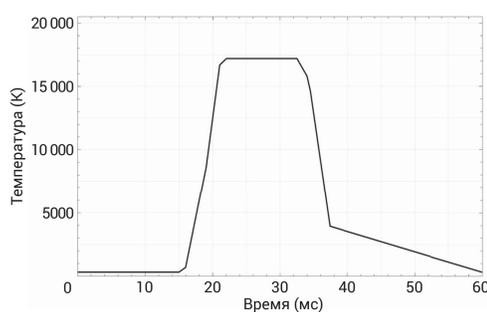
Кривая хода контактов



Расчетная модель ВЭБ-110: 1 — неподвижный дугогасительный контакт; 2 — подвижный дугогасительный контакт; 3 — малое сопло; 4 — большое сопло; А — надпоршневая область; Б — подпоршневая область

Параметры модели

Описание параметра	Параметр	
	Обозначение	Значение
Давление среды внутри аппарата	p	0,42 МПа
Начальная скорость потока	u	0 м/с
Температура окружающей среды	T	313 К
Константа интегрирования 1 ($k-\epsilon$ модель)	C_{e1}	1,44
Константа интегрирования 2 ($k-\epsilon$ модель)	C_{e2}	1,92
Коэффициент турбулентной модели $k-\epsilon$	C_μ	0,09
Параметр $k-\epsilon$ модели (турбулентная кинетическая энергия)	σ_k	1
Параметр $k-\epsilon$ модели (скорость турбулентного рассеивания)	σ_ϵ	1,3
Постоянная фон Кармана	k_ν	0,41



$$-n \cdot q = \rho C_p u_\tau \frac{(T_w - T)}{T^+}$$

$$T = T_0$$

На границах линии задается температура ствола дуги при отключении тока 10 кА.

Численное моделирование газодинамики

$$\rho = \rho(p_A, T)$$

Уравнения теплового баланса:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_p + Q_{vd}$$

$$Q_p = \alpha_p T \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla p \right)$$

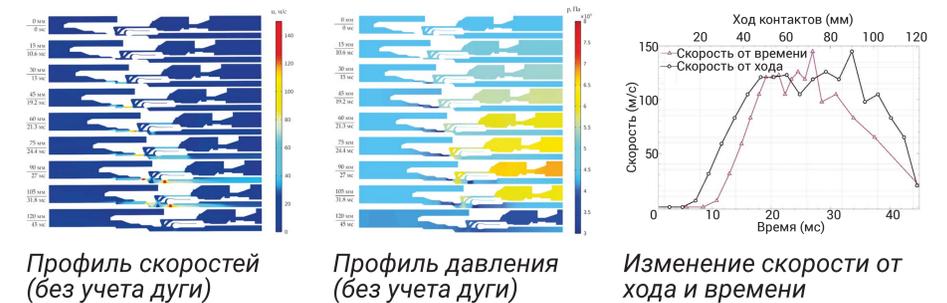
$$\mathbf{q} = -(k + k_T) \nabla T$$

$$Q_{vd} = \tau : \nabla \mathbf{u} + Q_{turb}$$

* Работа «PTFE Vapor Contribution to Pressure Changes in High-Voltage Circuit Breakers» (J.J. Gonzales и др., 2015)

Результаты расчетов

На поле профиля в цвете показан элегаз и соответствующее изменение зависимых переменных (скорость газа, давление, температура), а белым цветом показаны твердые элементы ДУ, участвующие в движении.

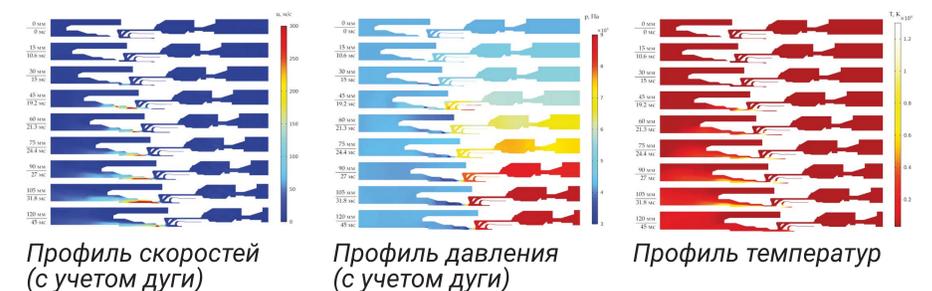


Профиль скоростей (без учета дуги)

Профиль давления (без учета дуги)

Изменение скорости от хода и времени

Образуется локальная область вдоль неподвижного дугогасительного контакта, где скорости преобладают.

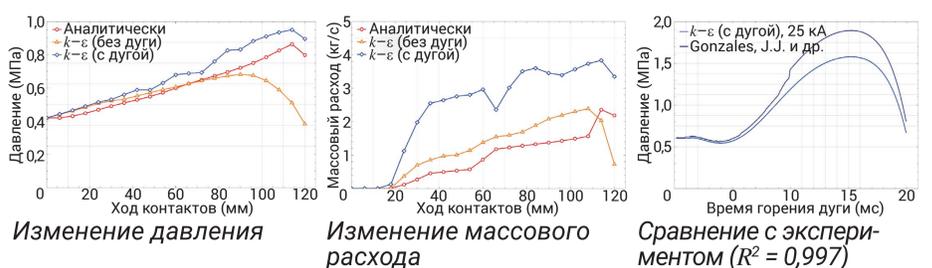


Профиль скоростей (с учетом дуги)

Профиль давления (с учетом дуги)

Профиль температур (с учетом дуги)

Точность разработанных моделей определялась в сравнении с экспериментами по отключению симметричного тока 25 кА* через расчет коэффициента детерминации R^2 по изменению давления в подпоршневой области.



Изменение давления

Изменение массового расхода

Сравнение с экспериментом ($R^2 = 0,997$)

Заключение

Допущения и критические параметры модели:

- 1) отсутствие клапана между подпоршневой и надпоршневой областями;
- 2) расчетная сетка на пограничных слоях имеет такое же качество, как и в основной расчетной области;
- 3) не учтены силы плавучести, так как дуга моделировалась поверхностью цилиндра (в 3D-постановке);
- 4) использовалось предположение о числах Маха $< 0,3$;
- 5) для повышения сходимости параметр точности подвижной сетки (relative tolerance) был взят равным 0,1.

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEUZ-2022-0030 «Разработка интеллектуальной мультиагентной системы для моделирования глубоко интегрированных технологических систем в электроэнергетике»).