



DOI: 10.18721/JEST.240206
УДК 533

*Н.К. Куракина^{1,2,3}, М.Э. Пинчук^{1,3}, А.В. Будин¹,
А.А. Смирновский², В.Я. Фролов²*

1 – ФГУН Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, Россия

2 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

3 – ООО «НПК «ЮниЛабс»», Санкт-Петербург, Россия

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ OPENFOAM ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЕ С ПОДВИЖНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Исследованы газодинамические процессы в рабочем объеме разрядной камеры экспериментального стенда с подвижным электродом для разработки конструкций дугогасительных систем. Для расчетов применен открытый пакет OpenFOAM с подключенной библиотекой swak4foam. Сформулирован ряд модельных допущений. Задача решалась в сплошносреднем приближении. Нагнетание газа в камеру происходит за счет разности давлений при начальных сверхзвуковых скоростях потока. Подвижный контакт перемещается за счет давления подаваемого в камеру газа. Подробно описаны методы создания трехмерной геометрической модели с движущейся сеткой. Приведены временные зависимости давления, скорости, температуры в месте развития дугового разряда при различных значениях давления газа на входе в камеру, а также график изменения во времени скорости подвижного контакта вплоть до момента зажигания дуги. Расчеты показали механизм выравнивания давления в рабочем объеме и достижение необходимой скорости размыкания контактов для эффективного дугогашения в диапазоне 20–25 м/с к моменту времени 4 мс при величине давления наддува газа в пределах 2–3 МПа.

Ключевые слова: численное моделирование, газодинамика, openfoam, swak4foam, движущаяся сетка, дугогашение.

Ссылка при цитировании:

Н.К. Куракина, М.Э. Пинчук, А.В. Будин, А.А. Смирновский, В.Я. Фролов. Численное исследование в программном пакете OpenFOAM газодинамических процессов в разрядной камере с подвижным электродом // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 2. С. 69–81. DOI: 10.18721/JEST.240206.

N.K. Kurakina^{1,2,3}, M.E. Pinchuk^{1,3}, A.V. Budin¹, A.A. Smirnovsky², V.Ya. Frolov²

1 – Institute for electrophysics and electric power of Russian academy of sciences,
St. Petersburg, Russia

2 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

3 – Research and Production Company «UniLabs», St. Petersburg, Russia

NUMERICAL SIMULATION USING OPENFOAM OF GAS-DYNAMICS IN THE DISCHARGE CHAMBER WITH A MOVABLE ELECTRODE

The study investigates gas-dynamics in the working volume of an experimental stand of the discharge chamber with a movable electrode for the purpose of developing arc systems. The free open-source OpenFOAM package connected with swak4foam is used for numerical simulation. Some model assumptions are formulated. The gas is injected into the chamber due to the difference in pressure at the initial supersonic velocities. The task is solved in the continuum mechanics approximation. The movable contact moves due to the pressure of the gas supplied to the chamber. The methods of creating a three-dimensional model with a dynamic mesh are described in detail. The study gives the time dependences of pressure, velocity, temperature in the region where the arc discharge develops for different inlet pressures, as well as the time-dependency of the moving contact velocity on arc ignition time. Numerical simulation shows the mechanism of pressure equalization in the working volume and achieving the piston velocity necessary for effective arc quenching in the range of 20–25 m/s by the time moment of 4 ms with the inlet gas pressure of 2–3 MPa.

Keywords: numerical simulation, gas-dynamics, openfoam, swak4foam, dynamic mesh, arc quenching.

Citation:

N.K. Kurakina, M.E. Pinchuk, A.V. Budin, A.A. Smirnovsky, V.Ya. Frolov, Numerical simulation using OpenFOAM of gas-dynamics in the discharge chamber with a movable electrode, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(02)(2018) 69–81, DOI: 10.18721/JEST.240206.

Введение

Одна из актуальных задач в области высоковольтной энергетики – разработка конструкций дугогасительных камер высоковольтных силовых выключателей, а также создание новых материалов и технологий для изготовления их контактных систем [1, 2]. Необходимость отключения токов порядка сотен килоампер диктуется увеличением плотности генерации и энергопотребления в развивающихся энергосистемах с соответствующим ростом токов короткого замыкания [3]. Желание минимизировать использование элегаза [2] делает необходимым поиск новых контактных материалов и испытание их характеристик при горении дуги в среде различных газов. Однако экспериментальная проверка новых конструкций и материалов остается весьма непростой и затратной задачей и требует сложного и дорогостоящего оборудования [4–9].

Компьютерное моделирование дает возможность существенно сократить время технической разработки изделий и сформулировать физические принципы функционирования различных устройств еще на стадии проектирования. Разработка физико-математической модели для целей предсказания воздействия различных факторов на рабочие элементы в модельной разрядной камере с подвижным электродом (РКПЭ) оказалась важным этапом создания исследовательского стенда [10, 11]. Стенд служит для изучения дуговых процессов, эрозии электродов, деградации изоляционных материалов при размыкании контактов с током до 150 кА в различных газовых средах. На стенде испытываются новые композитные электродные материалы при горении дуги в среде воздуха, азота и углекислого газа [12].

В настоящей работе для численного моделирования использовался свободно

распространяемый пакет OpenFOAM версии 4.1 [13]. Выбор OpenFOAM с открытым исходным кодом был обусловлен прежде всего его некоммерческой составляющей, а также возможностью модифицировать исходные алгоритмы и/или на их основе создавать собственные численные модели [14, 15]. Для комплексного изучения динамики изменения давления, температуры и других параметров необходимо моделировать задачу с учетом взаимодействия газа и подвижных элементов РКПЭ, что требует использования движущейся сетки в расчетах элементов. OpenFOAM обладает всеми необходимыми средствами для разработки таких расчетных схем [16].

Общей целью проводимых исследований является построение физико-математической модели с моделированием горения/гашения силовых выключателей при продуве рабочего газа в размыкающейся контактной системе для нужд разработки мощных электроразрядных устройств с использованием некоммерческого программного обеспечения.

В нашей работе для оптимизации элементов РКПЭ решалась задача исследования с использованием библиотек OpenFOAM и элементов перестроения расчетной сетки газодинамических процессов при наполнении газом основного рабочего объема РКПЭ с размыканием контактов. В данной статье представлены результаты расчетов с поперечным дутьем газа.

Постановка задачи

Экспериментальная установка. Экспериментальный стенд РКПЭ и принцип его работы подробно описан в публикациях [10, 11]. На рис. 1 представлена сборочная схема РКПЭ. Рабочая область камеры, применяемая в расчетной модели, отмечена круговым выделением.

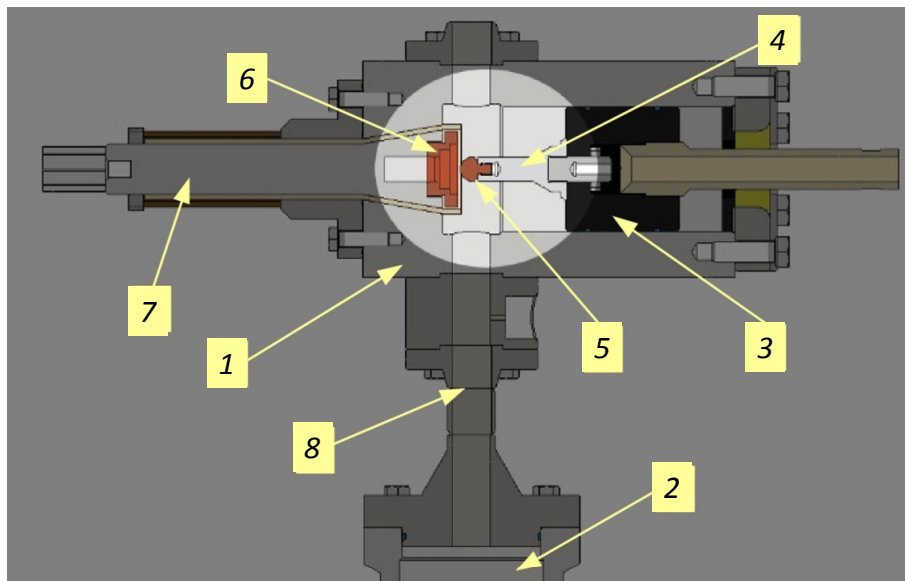


Рис. 1. Сборочная схема РКПЭ: 1 – корпус разрядной камеры; 2 – баллон с рабочим газом; 3 – поршень; 4 – анододержатель; 5 – анод; 6 – катод; 7 – токовод; 8 – диафрагма. Расчетная область отмечена круговым выделением
 Fig. 1. The discharge chamber with a movable electrode: 1 – case of the discharge chamber; 2 – vessel with the working gas; 3 – piston; 4 – anode holder; 5 – anode; 6 – cathode; 7 – current lead; 8 – inlet diaphragm. The computational region is noted as a circle

Установка включает в себя разрядную камеру 1 и баллон 2 с рабочим газом. Внутри корпуса камеры 1 находится подвижный поршень 3. К поршню крепится анододержатель 4, на конец которого навинчивается анод 5 из исследуемого материала. Катод 6 имеет форму кольца и крепится на тоководе 7, изолированном от корпуса камеры. Движение поршня осуществляется при помощи сжатого газа, который нагнетается в баллон и поступает в камеру после разрыва диафрагмы 8. В корпусе камеры имеется отверстие для измерения импульсного давления в разрядном объеме.

Модельные допущения. С учетом асимметричности геометрии РКПЭ в направлении движения газа задача поперечного продува воздушного потока требует использования трехмерной расчетной модели. Поэтому для оптимизации и ускорения расчетов сверхзвукового сжимаемого потока с движущейся сеткой был принят ряд допущений: примитизированы элементы

геометрии с целью удалить вырождение ячеек при перестроении сетки; предполагается, что движущийся элемент представляет плоскую поверхность поршня, масса которого составляет 1 кг; течение газа считается ламинарным; не учитываются массовые силы и сила трения поршня о стенки РКПЭ, составляющая по оценкам не более 1 % от воздействующей на поршень газодинамической силы; быстро протекающий процесс при сверхзвуковых скоростях заполнения камеры считается адиабатическим, т. е. изменение температуры газа в камере осуществляется без теплообмена со стенками; энергетический вклад дуги не учитывается, поскольку расчет проводится до момента зажигания дугового разряда. Такие упрощения минимально влияют на результаты исследований в данной постановке задачи и существенно уменьшают ресурсоемкость расчетов.

Математическая модель. Рассматривается сверхзвуковой поток сжимаемого газа в сплошносредном приближении и в пре-

небрежении массовыми силами. Основой численного метода для описания подобных задач [17] являются закон сохранения массы (1), закон сохранения количества движения (импульса) (2) и закон сохранения энергии (3), дополненные уравнением состояния (4):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau); \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} E) = \nabla \cdot (\vec{U} \tau) - \nabla \cdot (p \vec{U}); \quad (3)$$

$$\rho = \frac{pM}{RT}, \quad (4)$$

где t – время, ρ – плотность, \vec{U} – вектор скорости, p – давление, E – полная энергия, τ – тензор вязких напряжений, M – молярная масса, R – универсальная газовая постоянная, T – температура.

В OpenFOAM эта модель реализована в библиотеке с поддержкой движения сетки и топологических изменений `rhoCentralDyMFoam` [18]. Данный модуль предназначен для расчета течения сжимаемой среды, в том числе сверхзвуковых потоков, с использованием центральной разностной схемы Курганова–Тадмора [17, 19] и алгоритма решения уравнений методом контрольного объема [20, 21]. Система уравнений (1)–(4) решается при определении начальных и граничных условий, описываемых далее. Для задач с подвижными элементами сетки дополнительно применяются граничные условия, учитывающие движение границ. Фундаментальные уравнения распространения сжимаемого потока с учетом перестроения сетки подробно описаны в [22].

Подготовка расчетной схемы в OpenFOAM

Генерация расчетной сетки. При создании модели и численных расчетах в программном модуле OpenFOAM присутствует

ряд сложностей с построением и отладкой расчетных схем. В частности, OpenFOAM не имеет стандартного пользовательского интерфейса и представляет собой набор библиотек (алгоритмов), написанных на языке программирования C++. Поэтому для наглядного построения геометрии и генерирования сетки, кроме внутренней утилиты OpenFOAM `snappyHexMesh`, в качестве вспомогательной программы использовалась платформа Salome, версия 7.8.0 [23], позволяющая создавать геометрию и сетку для расчетной области любой сложности.

Построение геометрии и сетки в OpenFOAM осуществлялось в несколько этапов. На начальном этапе проектирования разрабатывалась трехмерная цифровая модель установки, из которой файл в формате `*.step` импортировался в программное приложение Salome. Здесь выделялась рабочая область разрядной камеры, группировались поверхности сеточной геометрии в формате `*.stl` для последующего использования в подпрограмме `snappyHexMesh`, формировалась фоновая блочная сетка расчетной области в формате `*.unv`. На втором этапе при использовании утилит `ideasUnvToFoam` и `snappyHexMesh` строилась пространственная сетка. OpenFOAM User Guide подробно описывает возможности модуля `snappyHexMesh` [14]. На третьем этапе для более тонкой настройки сетки для некоторых поверхностей и регионов назначались параметры построения сетки, отличные от параметров для всей поверхности. Так, для повышения качества сетки в областях со сложными геометрическими границами использовалась утилита `surfaceFeatureExtract`, выделяющая особенности границы в отдельный файл, а в области движения поршня задавался ограничивающий объем `searchableCylinder`.

Полученная пространственная модель РКПЭ с выделенными граничными поверхностями и расчетная сетка с различными уровнями сгущения представлена на рис. 2.

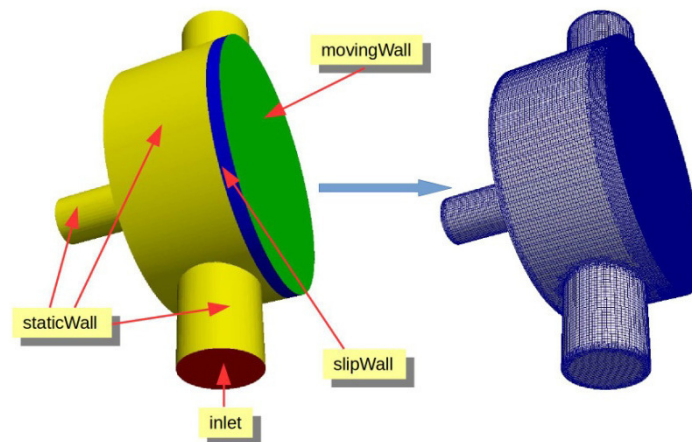


Рис. 2. Трехмерная модель РКПЭ и расчетная сетка
 Fig. 2. The 3D geometry and mesh of the discharge chamber with a movable electrode

В процессе построения сетки проводилась проверка сеточной сходимости. Для расчетов была выбрана сетка с количеством ячеек 750000.

Начальные и граничные условия. Предварительно для оценки начальных полей скорости в области inlet был применен расчет с неподвижной сеткой. При этом на входе inlet для давления использовались условия waveTransmissive (fieldInf=1–3 МПа; lInf=1 мм), для скорости – pressureInletOutletVelocity (для втекающего потока значение скорости на границе равно нормальной (к грани) компоненте скорости из центра прилегающей ячейки); на всех твердых стенках для давления и температуры задавались граничные условия 2-го рода zeroGradient, для скорости – условия прилипания noSlip. Полученные значения скоростей (в пределах от 425 до 512 м/с при значениях входного давления соответственно 1 и 3 МПа) усреднялись по времени 1 мс и подставлялись в граничные параметры fixedValue результирующего моделирования (см. табл. 1).

Принималось, что в начальный момент времени в рабочем элементе РКПЭ при атмосферном давлении (0,1 МПа) находился воздух комнатной температуры (300 К), теплофизические свойства которого были указаны в соответствующем файле constant/thermophysicalProperties.

Для расширения возможностей OpenFOAM и с целью исключить прямое редактирование кода решателя

rhoCentralDyMFoam была подключена библиотека swak4foam [24], позволяющая создавать собственные граничные условия и сочетающая в себе функциональность библиотек groovyBC и funkySetFields. Так, движение поршня массой 1 кг моделировалось как результат воздействия газодинамической силы, определяемой через интеграл функции давления движущегося потока по площади поверхности стенки (movingWall, рис. 2), что было отражено в файлах 0/pointMotionUz и 0/cellMotionUz в качестве граничного условия groovyBC.

Описание граничных параметров представлено в табл. 1. Здесь в качестве условий totalPressure и totalTemperature задаются соответственно значения полного давления и температуры, uniformFixedValue – постоянная по времени величина указанного параметра, slip/noSlip – условие проскальзывания/прилипания для скорости, movingWallVelocity – условие прилипания на движущейся стенке [14].

Движение сетки осуществлялось с помощью объекта dynamicMeshDict [25] в совокупности с граничными условиями groovyBC библиотеки swak4foam [24]. Модель расчета перемещения узлов dynamicMotionSolverFvMesh перестраивает сетку вокруг заданного набора границ как результат решения уравнения Лапласа. В данной задаче для преобразований ячеек сетки применялось уравнение Лапласа для скорости (объект velocityComponentLaplacian по OZ) и тип диффузии directional.

Таблица 1

Граничные условия

Table 1

The boundary conditions

Моделируемая граничная поверхность	Принимаемые граничные условия				
	p , МПа	U , м/с	T , К	pointMotionUz	cellMotionUz
inlet	totalPressure uniform (1-3)	fixedValue uniform (0 (425-512) 0)	totalTemperature uniform 300	uniformFixedValue constant 0	fixedValue uniform 0
staticWall	zeroGradient	noSlip	zeroGradient	uniformFixedValue constant 0	fixedValue uniform 0
slipWall	zeroGradient	noSlip	zeroGradient	slip	slip
movingWall	zeroGradient	movingWallVelocity uniform (0 0 0)	zeroGradient	groovyBC «toPoint(curVel_z)» uniform 0	groovyBC uniform 0 «toFace(pointMotionUz)»

Все расчеты проводились в параллельном режиме с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого [26].

Для декомпозиции расчетной сетки в OpenFOAM задавались параметры ее разбиения на блоки в файле system/decomposeParDict [14]. В зависимости от размеров сетки использовалось от 1 (28 ядер) до 3 (84 ядра) узлов. Например, с использованием 28 ядер и сетки с количеством ячеек 750000 время расчета составило 34,37 ч, 54 ч, 62,44 ч для давления на входе в камеру соответственно 1, 2, 3 МПа.

Обсуждение результатов расчетов

Для решения задачи использовался решатель OpenFOAM rhoCentralFoam с элементами перестроения сетки. Расчеты проводились до 4 мс – условно принятого момента времени зажигания дуги; шаг по времени составил 0,01 мкс.

Результаты моделирования оптимальных режимов визуализировались посредством программы Paraview [27]. Примеры отображения расчета для давления, скорости потока воздуха и температуры внутри камеры при давлении на входе 2 МПа для различного времени расчета представлены в табл. 2.

Для целей эффективного дугогашения необходимо обеспечить максимальный объемный расход газа через область горения дуги с одновременным равномерным наполнением газом РКПЭ. При этом нужно гарантировать достаточную скорость размыкания контактов, которая также поддерживается газодинамическими процессами в камере.

Процесс выравнивания давления в камере к моменту времени 4 мс, наглядно проиллюстрированный в табл. 2, нашел свое отражение на графике зависимости давления от расстояния по оси OZ геометрической модели установки (рис. 3). При изменении параметра входного давления воздушного потока от 1 до 3 МПа расстояние смещения поршня увеличилось на 0,027 м к моменту времени 4 мс.

На рис. 4 представлена зависимость скорости движения стенки поршня от времени протекания процесса нагнетания воздуха в рабочий элемент РКПЭ при различных значениях входного давления. Например, при давлении потока на входе 2 МПа во временном интервале 3–4 мс величина скорости поршня варьируется соответственно в пределах 20–29 м/с.

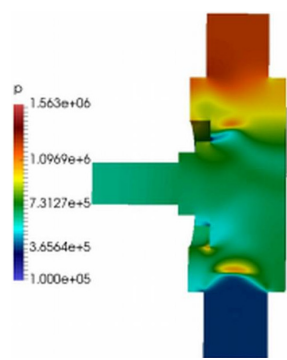
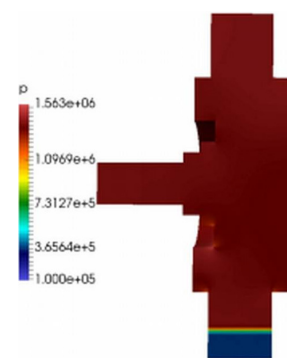
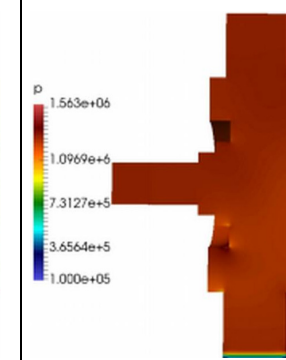
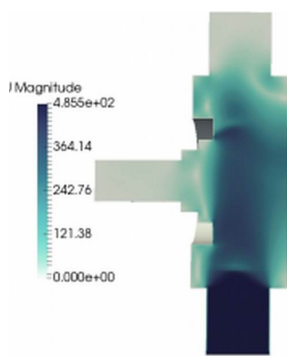
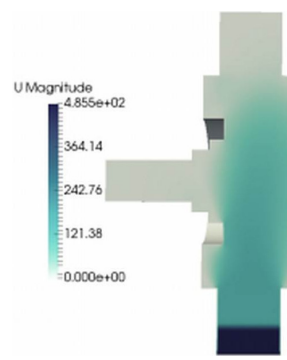
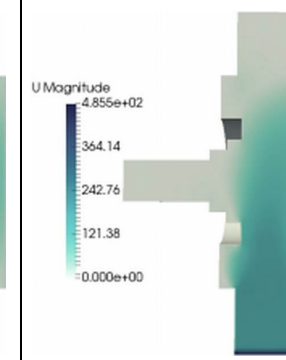
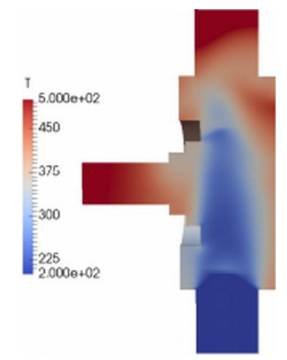
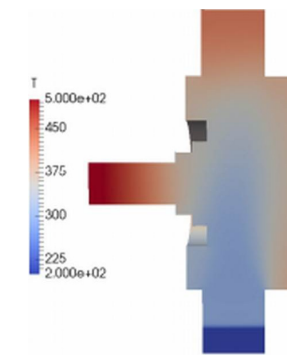
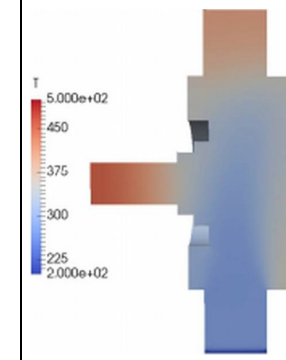


Таблица 2

Примеры отображения расчетов полей статического давления, скорости, температуры
в моменты времени при входном давлении газа 2 МПа

Table 2

Numerical simulation for static pressure, velocity and temperature fields at the time 1, 3, 4 ms
in the inlet gas pressure 2 MPa

Название поля и ед. измер.	Картинки полей для трех моментов времени		
	$t = 1$ мс	$t = 3$ мс	$t = 4$ мс
p , Па			
U , м/с			
T , К			

В экспериментах на исследуемом стенде для величины входного давления 2,5 МПа скорость разгона поршня массой 1,5 кг возрастает от 16,7 м/с в момент времени 2,84 мс

до величины 27 м/с к моменту времени 3,76 мс [11], что по предварительным оценкам показывает близкое соответствие расчетным данным, продемонстрированным на рис. 4.

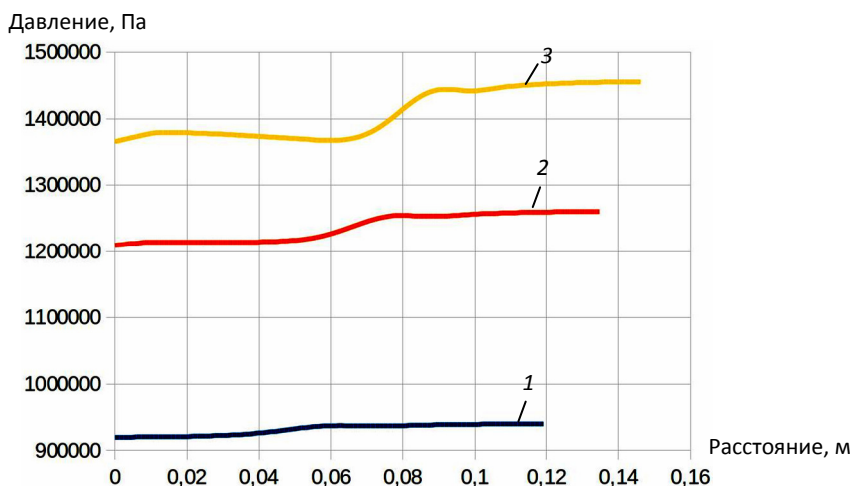


Рис. 3. Выравнивание давления в РКПЭ по оси OZ при наполнении камеры воздухом при различных параметрах входного давления в момент времени 4 мс (1 – 1 МПа; 2 – 2 МПа; 3 – 3 МПа)

Fig. 3. The pressure equalization in the discharge chamber with a movable electrode filled by air towards OZ at the time 4 ms in a different inlet pressure (1 – 1 MPa; 2 – 2 MPa; 3 – 3 MPa)

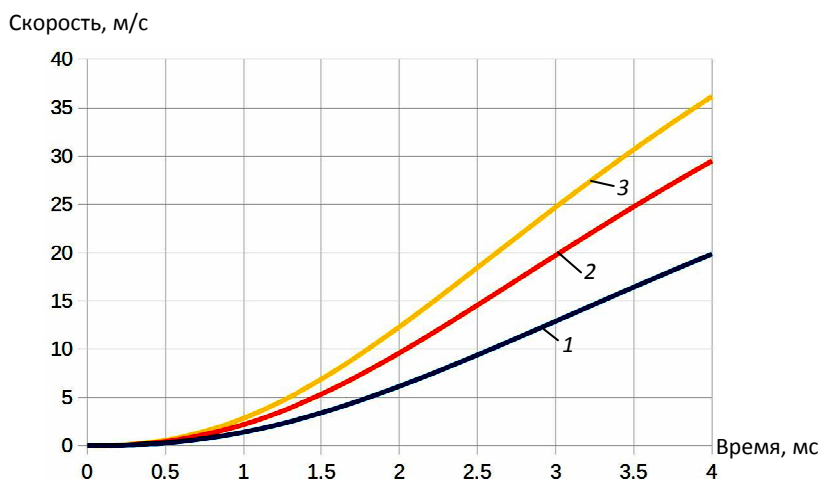


Рис. 4. Зависимость скорости разгона поршня от времени при наполнении камеры воздухом при различных параметрах входного давления (1 – 1 МПа, 2 – 2 МПа, 3 – 3 МПа)

Fig. 4. The piston velocity versus time at the discharge chamber with a movable electrode filled by air in a different inlet pressure (1 – 1 MPa, 2 – 2 MPa, 3 – 3 MPa)

В замкнутом объеме при начальных сверхзвуковых скоростях потока газа возникают его последовательные отражения от внутренних стенок РКПЭ. Вследствие торможения газового потока давление в месте отражения увеличивается, взаимодействие воздуха со стенками приводит к его нагреванию, часть кинетической энергии превращается во внутреннюю энергию газа, возникают отражающие волны

(подобно ударным волнам в аэродинамике). На фронте ударной волны резко меняются параметры потока. Его скорость снижается и становится дозвуковой, давление в потоке и температура газа скачком возрастают.

В результате моделирования были построены зависимости от времени давления, скорости потока и температуры в рабочем элементе РКПЭ в области предположи-



тельного нахождения дуги при различных значениях входного давления (рис. 5).

Описанные выше физические явления наблюдались в интервале до 1,5 мс. В следующий временной промежуток произошло нагнетание газа в объем РКПЭ, давление в камере увеличивалось почти ли-

нейно до момента времени 2,5–3 мс, когда начиналось движение поршня. Далее давление в месте предположительного горения дуги выравнивалось, температура снижалась до начальных величин, скорость потока соответствовала скорости разгона поршня (см. рис. 5).

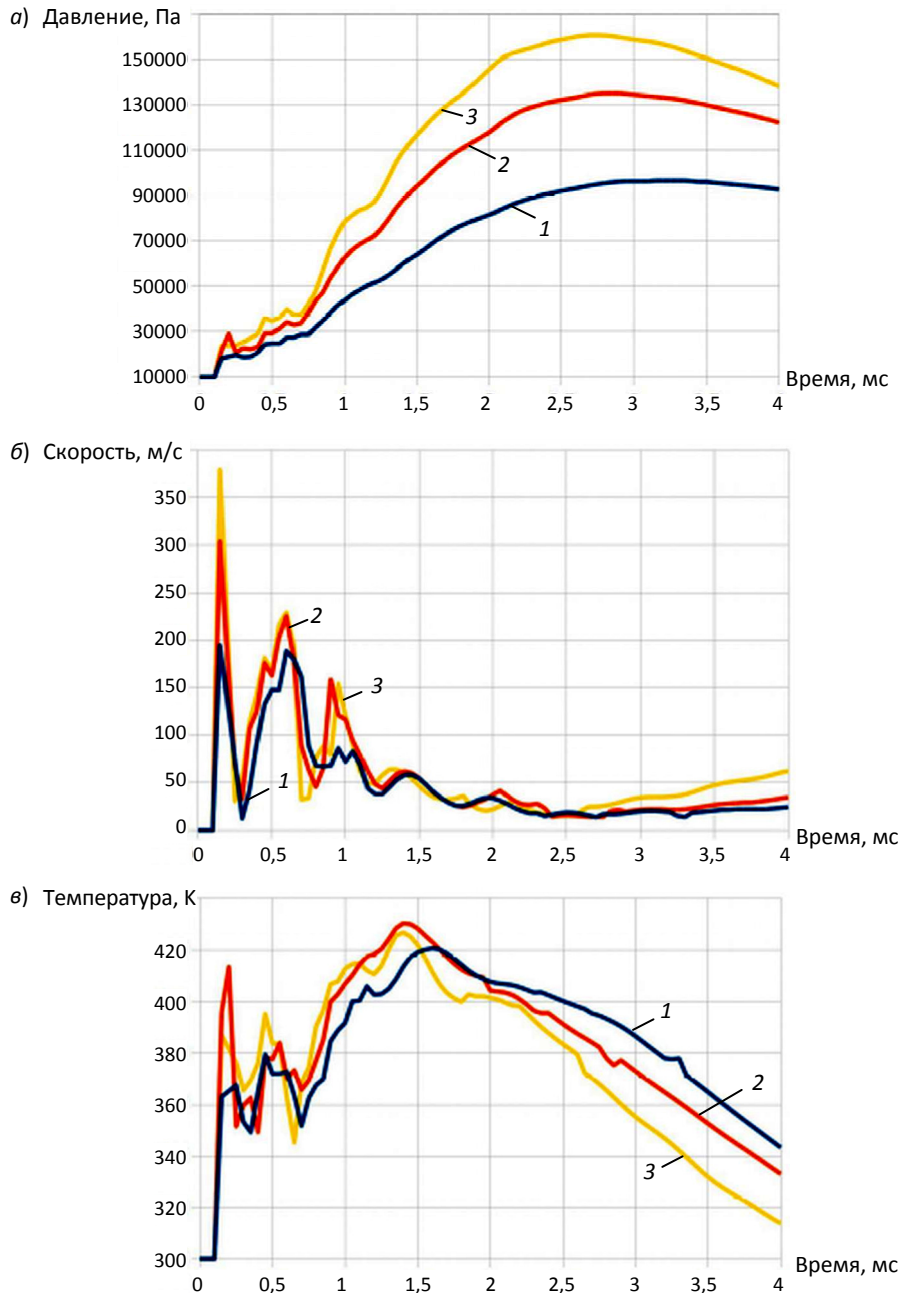


Рис. 5. Зависимость давления (а), скорости (б) и температуры (в) от времени в рабочем элементе РКПЭ при различных параметрах входного давления (1 – 1 МПа; 2 – 2 МПа; 3 – 3 МПа)

Fig. 5. Pressure (a), velocity magnitude (б) and temperature (в) versus time at the discharge chamber with a movable electrode filled by air in a different inlet pressure (1 – 1 MPa; 2 – 2 MPa; 3 – 3 MPa)

Заключение

Проделанная работа подтверждает, что первый этап построения физико-математической модели сильноточной дуги, основанный на исследовании газодинамических процессов и охлаждаемый поперечным потоком рабочего газа в размыкающейся контактной системе, успешно протестирован. По предварительным оценкам полученные результаты адекватно воспроизводят наблюдаемые в экспериментах явления. Так, следует отметить близкое соответствие расчетных и экспериментальных значений скорости разгона поршня при величине входного давления 2,5 МПа. Поэтому исследование газодинамических процессов при наполнении воздухом основного рабочего объема РКПЭ с использованием открытого пакета OpenFOAM с элементами перестроения сетки является целесообразным.

В качестве следующего шага верификации расчетной модели с поперечным дутьем газа планируется провести дополнительное исследование по сравнению дан-

ных математического моделирования и экспериментов, что будет описано нами в отдельной статье. На основании проведенных расчетов для экспериментов была выбрана оптимальная величина давления наддува газа в разрядную камеру в пределах 2–3 МПа для получения необходимой скорости размыкания контактов в диапазоне 20–25 м/с с одновременным обеспечением объемного продува газа через дугу.

Предлагаемая модель может быть полезна для решения задач газодинамики в сильноточных выключателях с продольным дутьем и в различных системах с подвижными элементами конструкции, таких, как описаны в [28].

Результаты расчета получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого [26].

Работа проводилась в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН №31 «Фундаментальные исследования физико-технических проблем энергетики».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тонконогов Е.Н.** Дугогасительные устройства выключателей высокого напряжения. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2011. 204 с.
2. **Glaubitz P., Stangherlin S., Biasse J.M., Meyer F., Dallet M., Pruefert M., Kurte R., Saida T., Uehara K., Prieur P., Ito H., Kynast E., Janssen A., Smeets R., Dufournet D.** CIGRE position paper on the application of SF 6 in transmission and distribution networks // *Electra*. 2014. No 274. P. 34–39.
3. **Александров А.С., Жуков В.В.** Ограничение токов коротких замыканий в сетях высокого напряжения развивающихся энергосистем. // *Вестник Московского энергетического института*. 2012. № 2. С. 58–66.
4. **Афанасьев В.В., Вишневский Ю.И.** Воздушные выключатели. Л.: Энергоиздат, 1981.
5. *Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения / Под ред. Афанасьева В.В.* Л.: Энергоиздат, 1987.
6. *Электрические аппараты высокого напряжения / Под ред. Александрова Г.Н.* . СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000.
7. **Каплан В.В., Нашатырь В.М.** Синтетические испытания высоковольтных выключателей. Л.: Энергия, 1980.
8. **Будин А.В., Пинчук М.Э., Пильщиков В.Е., Лекс А.Г., Леонтьев В.В.** Экспериментальный стенд для исследования устройств защиты воздушных линий электропередачи // *Приборы и техника эксперимента*. 2016. № 5. С. 55–59.
9. **Ковшечников В.Б., Литвинов Н.И., Наконечный Г.В., Овчинников Р.В., Суров А.В.** Исследование эрозионной стойкости медно-железных и медно-никелевых электродов // *Изв. вузов. Цветная металлургия*. 2005. Т. 46. № 1. С. 40.
10. **Budin A.V., Pinchuk M.E., Leontev V.V., Leks A.G., Kurakina N.K., Kiselev A.A., Simakova J.V., Frolov V.Ya.** Experimental stand for investigations of insulator degradation and electrode erosion in high-current breaker // *Plasma physics and technology*, 4(2): 2017. P. 120–123.
11. **Будин А.В., Пинчук М.Э., Кузнецов В.Е., Леонтьев В.В., Куракина Н.К.** Экспериментальный стенд для исследования дуговых и эрозионных процессов в высоковольтных сильноточ-



ных выключателях // Приборы и техника эксперимента. 2017. № 6. С. 61–66.

12. Будин А.В., Пинчук М.Э., Кузнецов В.Е., Рутберг Ф.Г. Влияние технологии изготовления композитного сплава железо–медь на его эрозионные свойства в сильноточной дуге высокого давления // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. Вып. 23. С. 49–57.

13. OpenFOAM. The OpenFOAM Foundation. [Электр. ресурс]. URL: <https://openfoam.org/> (дата обращения: 20.02.2018).

14. OpenFOAM. The OpenFOAM Foundation. User Guide, version 5.0 [Электр. ресурс]. URL: <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf> (дата обращения: 20.02.2018).

15. OpenFOAM. The OpenFOAM Foundation, Programmer's Guide, version 3.0.1, [Электр. ресурс]. URL: <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/ProgrammersGuide.pdf> (дата обращения: 20.02.2018).

16. Maric T., Höpken J., Mooney K. The OpenFOAM Technology Primer. Sourceflux UG, 2014. 442 p. ISBN: 978-3-00-046757-8.

17. Крапошин М.В. Математическое моделирование сжимаемых течений с использованием гибридного метода аппроксимации конвективных потоков: дисс. ... канд. физ.-мат. наук М., ИСП РАН, 2016. 182 с. [Электр. ресурс]. URL: http://keldysh.ru/council/3/D00202403/kraposhin_diss.pdf (дата обращения: 20.02.2018)

18. Official OpenFOAM Repository. OpenFOAM. [Электр. ресурс]. URL: <https://github.com/OpenFOAM/.../rhoCentralFoam/rhoCentralDyMFoam> (дата обращения: 20.02.2018).

19. Kurganov A., Tadmor E. New High-Resolution Central Schemes for Nonlinear Conser-

vation Laws and Convection–Diffusion Equations // Journal of Computational Physics. 2000. May. Vol. 160. No 1. P. 241–282. [Электр. ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1006/jcph.2000.6459> (дата обращения: 20.02.2018).

20. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

21. Патанкар С. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течениях в каналах. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 312 с.

22. Ferziger J.H., Milovan P. Computational Methods for Fluid Dynamics. 3, rev. ed. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002.

23. Salome. Version 7.8.0. [Электр. ресурс]. URL: <http://www.salome-platform.org/> (дата обращения: 20.02.2018).

24. Swak4foam. [Электр. ресурс]. URL: <http://openfoamwiki.net/index.php/Contrib/swak4Foam> (дата обращения: 20.02.2018).

25. OpenFoam, dynamicMeshDict. [Электр. ресурс]. URL: <http://openfoamwiki.net/index.php/DynamicMeshDict> (дата обращения: 20.02.2018).

26. Суперкомпьютерный центр Санкт-Петербургского политехнического Энергоатомиздат университета Петра Великого. [Электр. ресурс]. URL: www.scc.spbstu.ru (дата обращения: 20.02.2018).

27. Paraview. [Электр. ресурс], URL: <http://www.paraview.org> (дата обращения: 20.02.2018).

28. Булович С.В., Петров Р.Л. Пневматический разгон поршня в стволе // Письма в Журнал технической физики. 2005. Т. 31, вып. 16. С. 12–18.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КУРАКИНА Наталья Константиновна – младший научный сотрудник Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, инженер-исследователь ООО «НПК “ЮниЛабс”»
E-mail: nkuriee@gmail.com

ПИНЧУК Михаил Эрнестович – кандидат технических наук заведующий лабораторией Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, директор по науке и технической политике ООО «НПК “ЮниЛабс”»
E-mail: pinchme@mail.ru

БУДИН Александр Васильевич – кандидат технических наук заведующий лабораторией Института электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук
E-mail: avbudin@mail.ru

СМИРНОВСКИЙ Александр Андреевич – кандидат физико-математических наук доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: smirta@mail.ru

ФРОЛОВ Владимир Яковлевич – доктор технических наук заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: frolov.eed@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 26.03.2018

REFERENCES

- [1] **Tonkonogov E.N.**, Dugogasitel'nye ustroystva vyklyuchateley vysokogo napryazheniya [Arc quenching of high voltage switches.]. St. Petersburg: Izd-vo SPbGPU Publ., 2011. 204 p. (rus.)
- [2] **Glaubitz P., Stangherlin S., Biasse J.M., Meyer F., Dallet M., Pruefert M., Kurte R., Saida T., Uehara K., Prieur P., Ito H., Kynast E., Janssen A., Smeets R., Dufournet D.**, CIGRE position paper on the application of SF 6 in transmission and distribution networks, *Electra*. 2014. No 274: P. 34–39.
- [3] **Aleksandrov A.S., Zhukov V.V.**, Ogranichenie tokov korotkikh замыkaniy v setyakh vysokogo napryazheniya razvivayuzchikhsya energosistem/ [Limitation of short-circuit currents in high voltage networks of developing power systems.], *MPEI Vestnik*. 2012. № 2. P. 58–66. (rus.)
- [4] **Afanasi'ev V.V., Vishnevskiy Yu.I.**, Vozdushnye vyklyuchateli/ [Air Switches]. Leningrad: Energoizdat, 1981. (rus.)
- [5] **Afanasi'ev V.V.**, Spravochnik po elektricheskim apparatam vysokogo napryazheniya/ [A Handbook on High-Voltage Electrical Devices.]. Leningrad: Energoizdat, 1987. (rus.)
- [6] **Aleksandrov G.N.**, Elektricheskie apparaty vysokogo napryazheniya/ [High Voltage Electrical Devices], St. Petersburg: Ed. St. Petersburg. Gos. Tekhn. Univ., 2000. (rus.)
- [7] **Kaplan V.V., Nashatyr' V.M.**, Sinteticheskie ispytaniya vysokovol'tnykh vyklyuchatelei [Synthetic Tests of High-Voltage Switches.]. Leningrad: Energiya, 1980. (rus.)
- [8] **Budin A.V., Pinchuk M.E., Leks A.G., Leont'ev V.V., Pilschikov V.E.**, An experimental stand for investigating protective devices for high-voltage overhead lines, *Instruments and Experimental Techniques*. 2016. T. 59. № 5. S. 673–677. (rus.)
- [9] **Kovshechnikov V.B., Litvinov N.I., Nakonechny G.V., Ovchinnikov R.V., Surov A.V.**, Issledovanie erozionnoy stoykosti medno-zheleznykh i medno-nikelevykh elektrodov. [A study of erosion resistance of copper-iron and copper-nickel electrodes], *Russ. J. Nonferr. Metals*. 2005. Vol. 46. No 1. P. 40. (rus.)
- [10] **Budin A.V., Pinchuk M.E., Leontev V.V., Leks A.G., Kurakina N.K., Kiselev A.A., Simakova J.V., Frolov V.Ya.**, Experimental stand for investigations of insulator degradation and electrode erosion in high-current breaker, *Plasma physics and technology*, 4(2):120–123, 2017.
- [11] **Budin A.V., Pinchuk M.E., Kuznetsov V.E., Leont'ev V.V., Kurakina N.K.**, An Experimental Setup for Investigation of Arc and Erosion Processes in High-Voltage High-Current Breakers, *Instruments and experimental techniques*. 2017. Vol. 60. No 6. P. 837–842.
- [12] **Budin A.V., Pinchuk M.E., Kuznetsov V.E., Rutberg F.G.**, The influence of the production technology of iron-copper composite alloy on its erosion properties in a high-current high-pressure arc, *Tech. Phys. Lett.* 2014. Vol. 40, Issue 12. P 1061–1064. (rus.)
- [13] **OpenFOAM**. The OpenFOAM Foundation. Available: <https://openfoam.org/> (Accessed 20.02.2018).
- [14] **OpenFOAM**. The OpenFOAM Foundation. User Guide, version 5.0 Available: <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf> (Accessed 20.02.2018).
- [15] **OpenFOAM**. The OpenFOAM Foundation, Programmer's Guide, version 3.0.1, Available: <http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/ProgrammersGuide.pdf> (Accessed 20.02.2018).
- [16] **Maric T., Höpken J., Mooney K.**, The OpenFOAM Technology Primer. Sourceflux UG, 2014. 442 p. ISBN: 978-3-00-046757-8.
- [17] **Kraposhin M.V.**, Matematicheskoe modelirovanie szhimaemykh techeniy s ispol'zovaniem gibridnogo metoda approksimatsii konvektivnykh potokov: diss. kand.phys.-math.nauk [Compressible flows numerical simulation by a hybrid method for convective flows approximation.], *Moscow, ISP RAS*, 2016. 182 p. Available: http://keldysh.ru/council/3/D00202403/kraposhin_diss.pdf (Accessed 20.02.2018) (rus.).
- [18] **Official OpenFOAM Repository**. OpenFOAM. Available: <https://github.com/OpenFOAM/rhoCentralFoam/rhoCentralDyMFoam> (Accessed 20.02.2018).
- [19] **Kurganov A., Tadmor E.**, New High-Resolution Central Schemes for Nonlinear Conservation Laws and Convection–Diffusion Equations, *Journal of Computational Physics*. 2000. May. Vol. 160. No 1. P. 241–282. Available: <https://doi.org/10.1006/jcph.2000.6459> (Accessed 20.02.2018).
- [20] **Patankar S.**, Numerical Heat Transfer and fluid flow. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 152 p. (rus.)
- [21] **Patankar S.**, Computation of Conduction and Dust Flow Heat Transfer. Moscow: MPEI, 2003. 312 p. (rus.)
- [22] **Ferziger J.H., Milovan P.**, Computational Methods for Fluid Dynamics. 3., rev. ed. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002.



[23] Salome. Version 7.8.0. Available: <http://www.salome-platform.org/> (Accessed 20.02.2018).

[24] Swak4foam. Available: <http://openfoamwiki.net/index.php/Contrib/swak4Foam> (Accessed 20.02.2018).

[25] OpenFoam, dynamicMeshDict. Available: <http://openfoamwiki.net/index.php/DynamicMeshDict> (Accessed 20.02.2018).

[26] Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University Supercomputer Center. Available: www.scc.spbstu.ru (Accessed 20.02.2018).

[27] Paraview. Available: <http://www.paraview.org> (Accessed 20.02.2018).

[28] **Bulovich S.V., Petrov R.L.**, Pneumatic-driven piston acceleration in a barrel, *Tech. Phys. Lett.* 2005. Vol. 31, Issue 8. P. 682–684. (rus.)

THE AUTHORS

KURAKINA Nataliia K. — *Institute for electrophysics and electric power of Russian academy of sciences, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Research and Production Company «UniLabs»*

E-mail: nkuriee@gmail.com

PINCHUK Mikhail E. — *Institute for electrophysics and electric power of Russian academy of sciences, Research and Production Company «UniLabs»*

E-mail: pinchme@mail.ru

BUDIN Aleksandr V. — *Institut for electrophysics and electroenergetics RAS*

E-mail: avbudin@mail.ru

SMIRNOVSKY Aleksandr A. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: smirta@mail.ru

FROLOV Vladimir Ya. — *Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: frolov.eed@gmail.com

Received 26.03.2018