

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РАЗРЯДА В ГАЗАХ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ЧАСТИЦ

ВОРОБЬЕВ В.Ф., канд. техн. наук, БЕЛЯЕВ Г.В., КРАЙКОВ А.Н., аспиранты

**Предложена модель газоразрядного процесса в плоскопараллельной электродной системе, полученная методом крупных частиц. Рассмотрены структурная схема программы и особенности работы ее главных блоков.**

*Ключевые слова:* газоразрядный процесс, метод крупных частиц, электрическое поле.

## FORMING PROCESSES SIMULATION OF ELECTRIC DISCHARGE IN GASES BY MEANS OF PARTICLE-IN-CELL METHOD

V.F. BOROBIEOV, Ph.D. G.V. BELYAEV, postgraduate, A.N. KRAIKOV, postgraduate

**The work represents the model of gas-discharge process in parallel-sided electrode scheme, which was got by means of particle-in-cell method. There is the structural scheme of the program and the peculiarities of its main modules operating.**

*Key words:* gas-discharge process, particle-in-cell method, electric field.

При проектировании технологических установок, в которых используется газовый разряд, часто возникает проблема реализации дорогостоящих экспериментов по оптимизации электродных систем этих установок. Мировой опыт по конструированию подобных технологий свидетельствует о целесообразности замены физического эксперимента вычислительным с использованием математических моделей реальных физических процессов. Идея построения математической модели разряда в газах, в которой отслеживалось бы движение каждой частицы газа и ее взаимодействие с другими участниками процесса, кажется очень заманчивой. Однако на практике при разработке подобной программы возникает проблема ограниченного объема памяти и быстродействия современных компьютеров, поскольку даже при низких давлениях газа порядка  $10 \text{ Па}$  в  $1 \text{ м}^3$  объема может содержаться около  $10^{18}$  частиц. Преодолеть эти трудности возможно, используя так называемый метод крупных частиц.

Метод крупных частиц основан на предложении А.А. Власова рассматривать ансамбли частиц, обладающих одинаковыми или близкими свойствами, как единое целое и анализировать взаимодействие не отдельных частиц (как это предполагается в кинетической теории), а этих ансамблей [1]. Это позволяет значительно сократить требуемый для программы объем оперативной памяти и реализовать вычислительный эксперимент за приемлемый промежуток времени.

Для анализа процессов формирования разряда в газах была разработана программа PLASMA, в которой рассматривается плоскопараллельная система электродов, а крупные частицы представляются в виде плоских «листов», расположенных между электродами. Часто к таким крупным частицам применяют термин «облака частиц». Облака частиц могут состоять из атомов, молекул, электронов и ионов. При этом должно соблюдаться условие – свойства компонентов облака должны быть одинаковыми. Программа позволяет моделировать газоразрядные процессы не только в однокомпонентных газах, но и газовых смесях, в состав которых могут входить до 12 компонентов. В качестве исходных данных принимаются такие параметры газа, как давление и температура. Напряжение на электродах может задаваться в широких пределах как неизменным по времени, так и зависящим от него. В программе учитываются следующие виды взаимодействий облаков крупных частиц: ударная ионизация атомов электронами, рекомбинация положитель-

ных ионов и электронов и др. Для расширения возможностей модели эта часть программы реализуется как динамически подключаемая библиотека, поэтому пользователи по мере необходимости могут сами добавлять математические описания тех взаимодействий, которые необходимо учесть в конкретной задаче.

В процессе работы программы вся информация о параметрах облаков крупных частиц (координаты, скорость, тип составляющих частиц и их количество в облаке) хранится в оперативной памяти компьютера в динамических массивах. Обращение во время вычисления только к ячейкам оперативной памяти позволяет минимизировать время проведения компьютерного эксперимента. В целях экономии оперативной памяти весь программный комплекс разделен на две независимые части. В первой части осуществляется подготовка исходных данных и инициализация параметров облаков крупных частиц в соответствии с распределением Максвелла. Подготовленные данные сохраняются на жестком диске компьютера; работа первой части программного комплекса на этом завершается.

Во второй части программного комплекса реализуется моделирование процессов движения облаков крупных частиц в межэлектродном пространстве и их взаимодействие друг с другом.

Суть предлагаемого к рассмотрению метода заключается в том, что программа (рис. 1) просматривает треугольную матрицу взаимодействий крупных частиц и ищет ближайшее по времени взаимодействие из всей совокупности взаимодействий. Поскольку найденное взаимодействие имеет минимальное время реализации ( $\Delta t_{\min}$ ), то возможно переместить все облака частиц в пространстве на это время  $\Delta t_{\min}$ , считая, что процесс их перемещения – без столкновений. Для незаряженных облаков крупных частиц (нейтральные атомы и молекулы) это движение принимается равномерным, а для заряженных частиц – равноускоренным с учетом действующих на них кулоновских сил в электрическом поле. Пара облаков, которая имела минимальное время взаимодействия, после перемещения вновь вступает во взаимодействие. После анализа типа взаимодействующих компонентов, их количества на облаках и энергии взаимодействия программа инициализирует создание новых облаков с параметрами доли компонентов, которые в соответствии с вероятностной моделью вступили во взаимодействие.

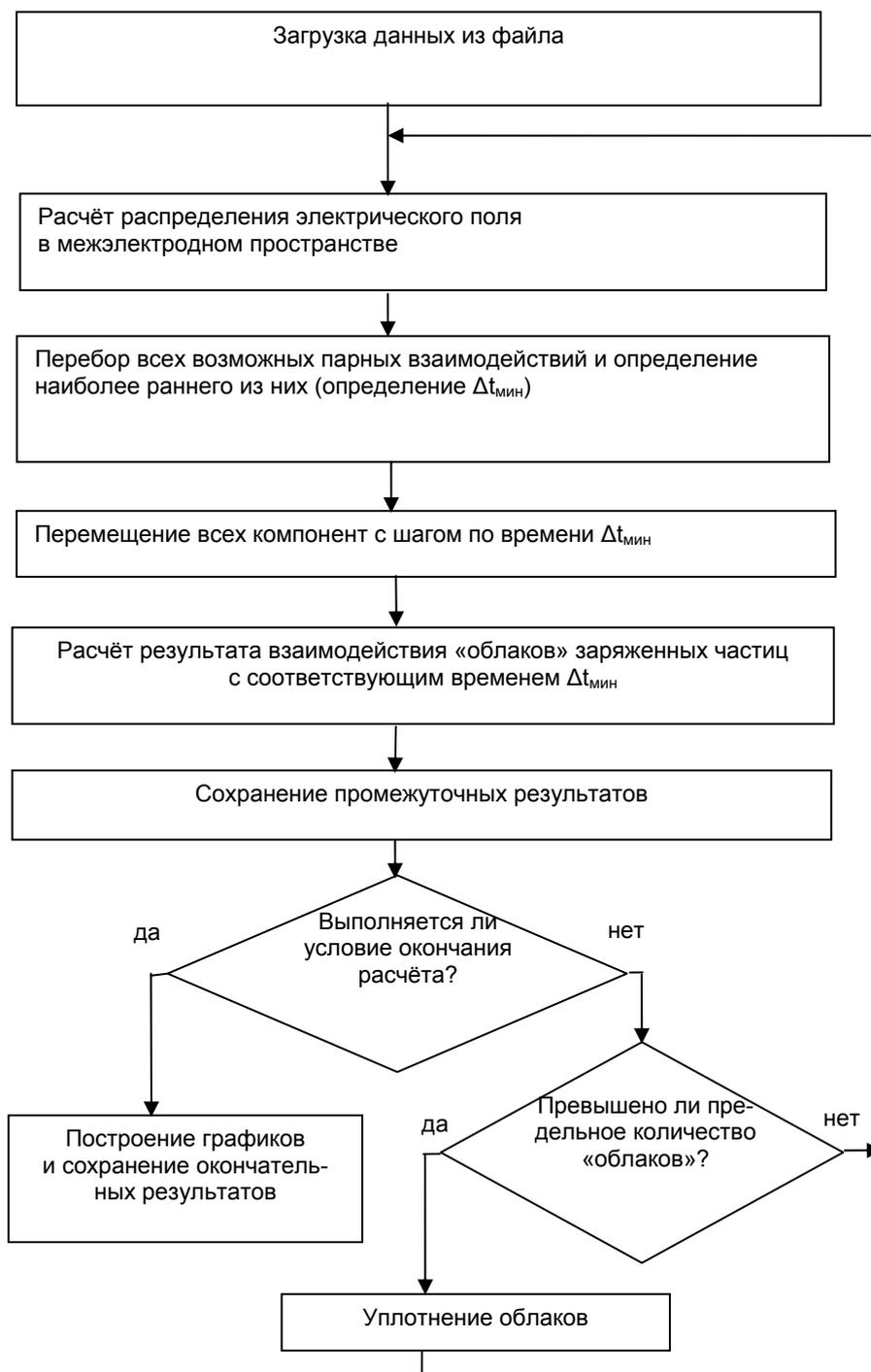


Рис. 1. Блок-схема программы расчета газоразрядного процесса

Таким образом, в процессе счета увеличиваются количество облаков крупных частиц и время счета одного цикла. Если не предпринять каких-либо специальных мер, то через некоторое количество шагов программа остановится по причине переполнения оперативной памяти компьютера. Поэтому в программе предусмотрено на определяемом пользователем шаге работы приостановить цикл счета и осуществить уплотнение облаков крупных частиц. Подпрограмма уплотнения облаков осуществляет нахождение близко расположенных однотипных облаков с близкими значениями векторов скоростей и объединяет их в одно облако. При таком объединении облаков крупных частиц происходит их «взвешивание», в результате которого новое, объединенное, облако не приводит к искажению исходного распределения электрического поля

вдоль разрядного промежутка и не нарушает баланса распределения энергий по компонентам газовой смеси.

Поскольку в процессе счета в модели осуществляется перемещение заряженных облаков крупных частиц и инициализация новых, поле в разрядном промежутке постоянно изменяется. Поэтому в каждом цикле работы программы выполняется расчет электрического поля вдоль разрядного промежутка. Расчет поля основан на решении уравнения Пуассона с граничными условиями, определяемыми заданными значениями потенциалов электродов в рассматриваемый момент времени. При замене реального распределения зарядов в разрядном промежутке сосредоточенными зарядами на облаках крупных частиц распределение электрического поля искажается. Для более точного расчета сил, действующих на облака заряженных крупных частиц, в программе предусмотрен алгоритм восста-

новления истинного распределения электрического поля вдоль разрядного промежутка. Восстановление истинного распределения поля выполняется методом кубического сплайнирования. При этом принимается, что напряженность электрического поля на плоскостях электродов в процессе кусочно-линейной аппроксимации распределения плотностей зарядов в промежутке определяется точно.

Кроме того, при таком восстановлении проверяется условие равенства интеграла от функции распределения напряженности электрического поля по всей длине разрядного промежутка величине разности потенциалов на электродах в данный момент времени.

Для оценки достоверности полученных результатов была произведена проверка работоспособности программы на задаче, в которой оценивалось условие самостоятельности развития разряда в плоскопараллельной электродной системе. Длина разрядного промежутка принята  $L = 0,2$  м, давление газа (азот)  $P = 10$  Па, температура газа  $T = 293$  К, разность потенциалов между электродами  $U = 500$  В. Облако начальных электронов с суммарным зарядом  $Q_e = 1,6 \cdot 10^{-17}$  Кл располагалось вблизи катода. После начала работы программы поле в разрядном промежутке начинает искажаться. Вблизи катода напряженность электрического поля возрастает, а вблизи анода снижается. После прохождения нескольких вторичных лавин распределение напряженности поля имеет вид зависимости (рис. 2).

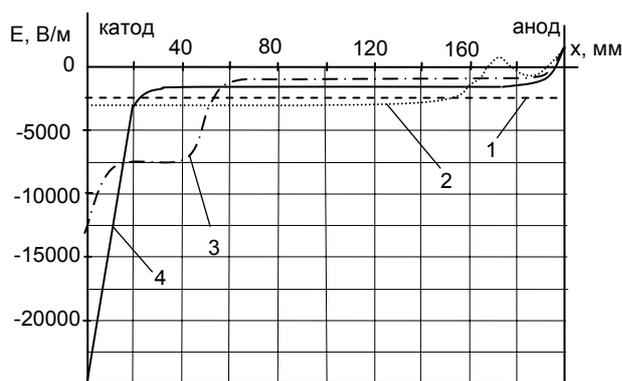


Рис. 2. Напряженность электрического поля в межэлектродном промежутке в разные моменты времени: 1 – 0 нс; 2 – 0,2 нс; 3 – 8 нс; 4 – 20 нс

Полученное распределение поля наблюдается в тлеющем разряде, что подтверждает работоспособность предложенной программы.

#### Список литературы

1. Власов А.А. Теория многих частиц. – М.: Гос-техтеориздат, 1950.

*Воробьев Виктор Федорович,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики,  
телефон (4932) 26-97-28,  
e-mail: vvf@vetf.ispu.ru

*Беляев Георгий Владимирович,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры высоковольтной электроэнергетики, электротехники и электрофизики  
телефон (4932) 26-97-28,  
e-mail: vvf@vetf.ispu.ru

*Крайков Алексей Николаевич,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант,  
телефон (4932) 26-97-28,  
e-mail: vvf@vetf.ispu.ru