

многозначном законе фильтрации менялось от 0.1 до 1. Как видно из рисунков, застойные зоны при этом увеличиваются, что соответствует физике моделируемого явления.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 12-01-00955, 12-01-97022).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Лапин А. В. *Об исследовании некоторых нелинейных задач теории фильтрации* // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1979. – Т. 19. – № 3. – С. 689–700.

2. Ентов В. М., Панков В. Н., Панько С. В. *Математическая теория целиков остаточной вязкопластичной нефти*. – Томск: Изд-во Томского государственного университета, 1989. – 196 с.

В. В. Бандеров, В. С. Желтухин, В. Ю. Чебакова

Казанский (Приволжский) федеральный университет,

Victor.Banderov@ksu.ru, vzheltukhin@gmail.com,

vchebakova@mail.ru

ПРОГРАММЫЙ КОМПЛЕКС РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЕМКОСТНОГО РАЗРЯДА В АРГОНЕ

Рассмотрена задача о нахождение основных параметров нестационарного высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда пониженного давления в одномерном приближении, которая,

как показано в работе [1], представляет собой нелинейную систему краевых и начально-краевых задач. А именно, уравнение Пуассона для потенциала электрического поля, уравнения диффузии–конвекции для ионной и электронной концентрации, уравнение непрерывности для метастабилей, и уравнения для электронной и газовой температур.

Данная система краевых и начально-краевых задач характеризуется несколькими особенностями, осложняющими разработку алгоритма и численного метода ее решения. Во-первых, она состоит из задач разного типа: начально-краевых задач для уравнений с частными производными параболического типа и краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, в которых время входит как параметр. Во-вторых, наличие разных временных масштабов изменения основных характеристик установившегося состояния ВЧЕ-разряда пониженного давления. В-третьих, возникновение больших градиентов плотности заряженных частиц и напряженности электрического поля в приэлектродных слоях на границах расчетной области, то есть если в квазинейтральной области мы имеем процесс с доминированием диффузии (регулярно возмущенная задача), то в приэлектродных областях наблюдается случай сильного доминирования конвекции (сингулярно возмущенная задача). Это приводит к появлению областей сильного изменения решения, в частности, пограничными и внутренними переходными слоями. В-четвертых, представленная система задач является нелинейной, как по отдельным входящим в нее уравнениям, так и в целом.

Для численной реализации модели использовалась неявная конечно-разностная схема с равномерным разбиением сетки и сносом нелинейности на предыдущий слой, а также

линеаризацией по методу Ньютона. Оператор конвективного переноса аппроксимировался методом направленных разностей. Применение интегро-интерполяционного метода обеспечило консервативность конечно-разностной схемы [2].

Разработан комплекс программ в среде Matlab, с помощью которого производилось численное моделирование рассматриваемых процессов. Программы написаны в соответствии с модульным принципом, что позволило осуществить раздельное программирование, отладку и тестирование составных частей пакета программ, а также простую модернизацию и настройку пакета на решение задач различного уровня сложности. Для создания графического интерфейса использовалась специализированная среда GUIDE (см. [3, 4]).

Для ряда модельных задач были проведены численные эксперименты. Расчеты проводились до выхода процесса на установившийся периодический режим, когда достигался полный баланс заряда в межэлектродном промежутке: заряд, который уносится за период на электрод электронам, и в точности компенсируется выносом положительного заряда ионами. Результаты расчетов, проведенных нами, показали хорошее качественное совпадение с результатами, приведенными в [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 11-01-00864, 12-01-00955, 13-01-00908, 13-01-31515) и Министерства образования РФ (соглашение № 14.В37.21.1948).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Желтухин В. С., Чебакова В. Ю., Шнейдер М. Н. *Математическая модель ВЧЕ-разряда при больших межэлектродных расстояниях* // Материалы Международной научной конференции “Плазменные технологии исследования, модификации и получения материалов различной физической природы”

(16-18 октября 2012 г.). – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2012. – С. 93–96.

2. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. *Численные методы решения задач конвекции-диффузии*. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 248 с.

3. Бадриев И. Б., Бандеров В. В., Задворнов О. А. *Разработка графического пользовательского интерфейса в среде MatLab*. – Казань: Изд-во Казанского федерального университета, 2011. – 112 с.

4. Бандеров В. В. *Создание пользовательского интерфейса при разработке программных комплексов в среде MATLAB // Сеточные методы для краевых задач и приложения*. Материалы Девятой Всероссийской конференции. – Казань: Отечество, 2012. – С. 48–49.

5. Lymberopoulos D. P., Economou D. J. *Fluid simulations of glow discharge & effect of metastable atoms in argon // J. Appl. Phys.* – 1993. – V. 73. – No 8. – P. 3668–3679.

И. С. Балафендиева, Д. В. Бережной

Казанский (Приволжский) федеральный университет,

e_xo@mail.ru, Dmitri.Berezhnoi@ksu.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ПОДЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Настоящая работа посвящена разработке и численной реализации методики решения задач деформирования элементов трехмерных конструкций, взаимодействующих между собой и