**Глава 3. Результаты численного моделирования**

Результаты численного моделирования позволили получить и проанализировать следующую информацию об изучаемом процессе:

* пространственное распределение электронов и протонов, что дает возможность проследить за эволюцией плазмы во времени;
* изменение плотностей электронов и ионов во времени;
* данные об энергиях частиц (электронов и протонов) для анализа изменения энергетического спектра во времени, а также эффективности ускорения протонов;
* потери частиц из плазмы, для анализа степени заряженности получаемой плазмы;
* величину индукции собственного магнитного поля плазмы;
* напряженность поля поляризации, возникающего в процессе коллективного ускорения.

3.1. **Ускорение электронов в режиме СГА**

На первом этапе моделирования было проведено изучение ускорения электронов плазмы инжекции в условиях синхротронного гиромагнитного авторезонанса. Расчеты проводились для следующих исходных параметров плазмы:

* начальная средняя энергия электронов плазмы инжекции *W0*= 10 эВ;
* плотность исходной плазмы *n*=(5109 см-3 – 11010 см-3). Радиус плазмы инжекции *r*=1.25 см;
* амплитуда СВЧ - поля – 2 кВ/см (2,45 ГГц);
* начальные энергии ионов – единицы электрон-вольт;
* время СГА – импульса 1 – 4 мкс.

Сечения пространственного распределения плазмы представлены на рисунке 5.



Рис.5. Поперечные XY и ZY сечения пространственного распределения электронов и ионов перед стадией ускорения в режиме СГА.

Результаты представленные на рисунке 6, иллюстрируют характер изменения значений энергии электронов в зависимости от времени СГА – импульса. В задаче электроны плазмы ускоряются в режиме СГА, а в дальнейшем на стадии адиабатической компрессии энергия электрона увеличивается вследствие бетатронного эффекта, плотность плазмы возрастает.

Проблема состоит в том, что в процессе СГА плотность плазмы падает вследствие возрастания радиусов ларморовских орбит электронов. Кроме того 20 – 25% частиц теряются на стенках камеры или не захватываются в режим СГА. Таким образом, для достижения возможно большей энергии длительность СГА – импульса должна быть достаточно большой, но в этом случае процесс адиабатической компрессии менее эффективен по сравнению с плазмой с более низкой энергией.

Изменение средней энергии электронов во времени для различных времен СГА – импульса с дальнейшей адиабатической компрессией представлено на рисунке 5.



Рис. 6. Зависимость энергии электрона от времени СГА – импульса:

1 – время СГА – импульса 1мкс; 2 – время СГА – импульса 2 мкс;

3 – время СГА – импульса 4мкс.

В проведенном численном эксперименте ускорение электронов исходной плазмы в режиме СГА проводились до средней энергии электронов 1 МэВ. На рисунке рис. 7. представлены пространственное распределение и энергия электронов и ионов после стадии GYRAC. Из рисунка следует, что ускорение электронов сопровождается снижением плотности плазмы, прежде всего в радиальном направлении. В то же время, в аксиальном направлении обеспечивается сжатие плазмы. Фактически, возникающий объект является релятивистским сгустком электронов, удерживающим своим кулоновским поле ионы. Число электронов на несколько процентов превышает число ионов, таким образом, полученный объект является отрицательно заряженным, однако степень заряженности не превышает 5%. Средняя плотность электронной компоненты снижается с 11010 см-3 до 6109 см-3.



Рис. 7. Поперечные XY (слева, вверху) и ZY (справа, вверху) сечения пространственного распределения электронов (красные символы) и ионов (синие символы) соответственно; энергетический спектр электронов.