

УДК 533.951.2

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРНОГО ФАКТОРА НА РАЗВИТИЕ ДВУХПОТОКОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ПЛАЗМЕ

08, август 2012

Курочкин А.В.

*Студент,
кафедра «Физика»*

*Научный руководитель: Иванов М.Ф.,
доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Физика»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
antkurochkin@gmail.com

В настоящее время численное моделирование стало неотъемлемой частью исследования кинетических процессов в плазме. Одним из наиболее распространенных методов теоретического исследования кинетики плазмы является метод «частиц в ячейках» [1-3].

В данной работе исследовалось влияние пространственного фактора на развитие двухпотоковой электрон-электронной неустойчивости в плазме. Исследования проводились с целью тестирования разработанного автором компьютерного кода расчёта двух- и трёхмерных задач физики бесстолкновительной плазмы.

Для описания динамики электрон-ионной плазмы в самосогласованном электростатическом поле использовалась система уравнений Власова-Максвелла [4]. При решении уравнений Власова-Максвелла удобно перейти к безразмерным переменным. За единицу времени выберем обратную электронную плазменную частоту, соответствующую средней невозмущенной плотности электронов, за единицу длины – начальный дебаевский радиус, за единицу заряда – абсолютную величину заряда электрона, за единицу массы – массу электрона. Тогда скорости частиц будут измеряться в единицах $\omega_{pe}r_D$, а напряженность электростатического поля в единицах $4\pi n_0 e r_D$, где n_0 – невозмущенная электронная плотность, а выражения для ω_{pe} и r_D имеют вид

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi n_0 e^2}{m_e}}, \quad r_D = \sqrt{\frac{kT}{4\pi n_0 e^2}}.$$

Система уравнений Власова-Максвелла при выбранных параметрах обезразмеривания примет вид

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} + \vec{v} \nabla_r f_e + \vec{E} \nabla_v f_e = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + \vec{v} \nabla_r f_i + \frac{Z}{m_i} \vec{E} \nabla_v f_i = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial r} = \left(Z \int_{-\infty}^{\infty} f_i d\vec{v} - \int_{-\infty}^{\infty} f_e d\vec{v} \right) / n_0.$$

Переходя от напряженности $\vec{E}$ к потенциалу φ , вместо уравнения (2) можно использовать уравнение Пуассона:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} = -\rho(\vec{r}, t).$$

Для интегрирования уравнений движения воспользуемся схемой «leap-frog»

$$\vec{v}^{n+\frac{1}{2}} = \vec{v}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{q_\alpha}{m_\alpha} \vec{E}(\vec{r}^n) \Delta t,$$

$$\vec{r}^{n+1} = \vec{r}^{n-1} + \vec{v}^{n+\frac{1}{2}} \Delta t,$$

где Δt – шаг по времени.

Размеры ячеек выбраны равными дебаевскому радиусу. Тогда, как следует из опыта многочисленных расчетов, шаг по времени достаточно выбрать равным $\Delta t = 0.2 \omega_{pe}^{-1}$. Для корректного моделирование бесстолкновительной плазмы необходимо, чтобы число частиц в дебаевской сфере удовлетворяло условию

$$\frac{1}{N_D} \ln N_D \ll 1,$$

где N_D – число частиц в дебаевской сфере. Взвешивание частиц проводилось по методу «частица в ячейке» или PIC [1].

Наглядное представление об отличии в результатах одномерного и многомерных расчетов, выполненных описанным выше методом частиц в ячейке, можно получить из результатов численного моделирования двухпотоковой электрон-электронной неустойчивости. Два потока электронов дрейфуют через неподвижные ионы, образующие однородный положительный фон. В начальный момент времени $t = 0$ потоки имеют дрейфовые скорости ± 1 и слегка возмущены по координате. Одномерное моделирование выполнялось только по оси y с периодом $L = 2\pi r_D$. Двумерное моделирование проводилось в квадрате (x, y) со стороной, равной L . Трехмерное – в кубе с ребром L . Во всех трех случаях накладывались периодические граничные условия на движение электронов и на электростатический потенциал.

На рис. 1-3 представлены распределения частиц плазмы в плоскости (y, v_y) фазового пространства для трех последовательных моментов времени, а также энергия электрического поля системы.

В одномерном случае имеем

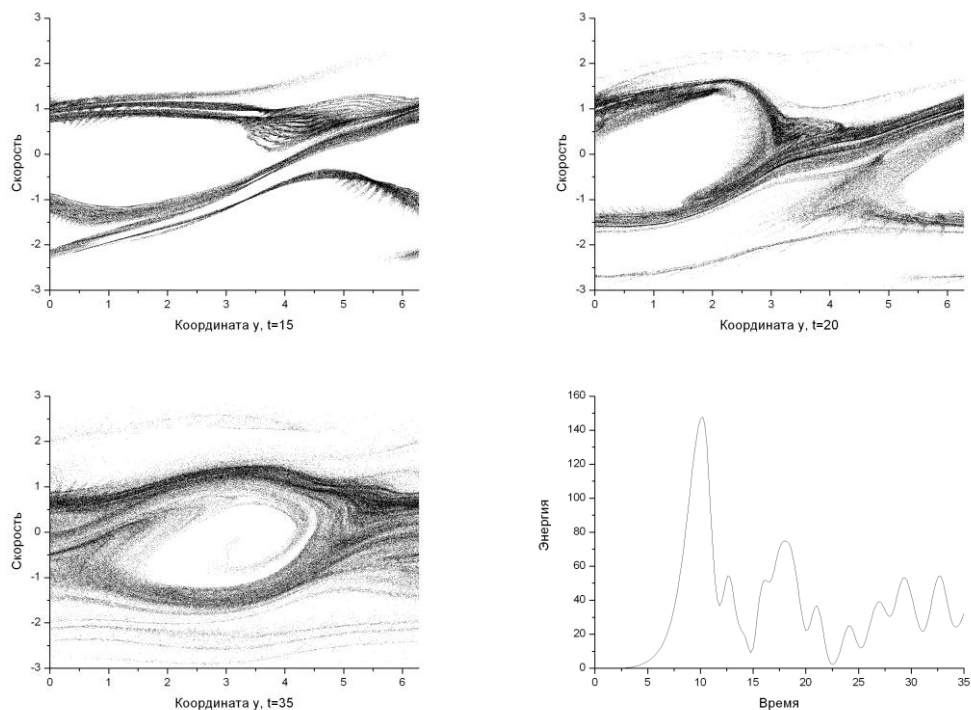


Рис. 1. Пример расчета двухпотоковой электрон-электронной неустойчивости для одного измерения.

В двухмерном случае получим

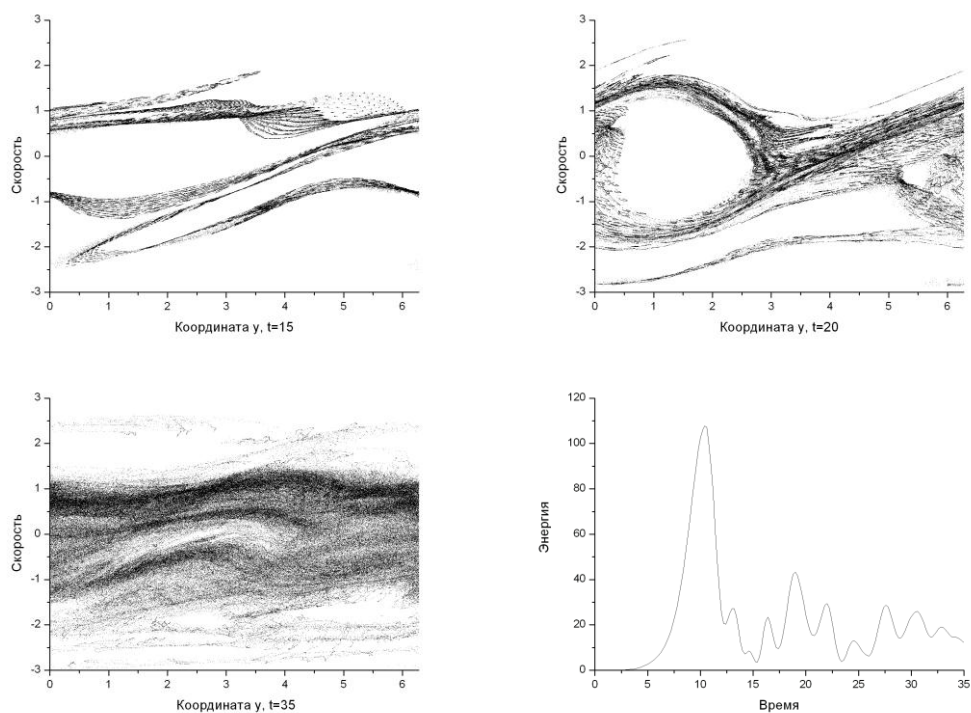


Рис.2. Пример расчета двухпотоковой электрон-электронной неустойчивости для двух измерений.

Для трехмерного расчета получим

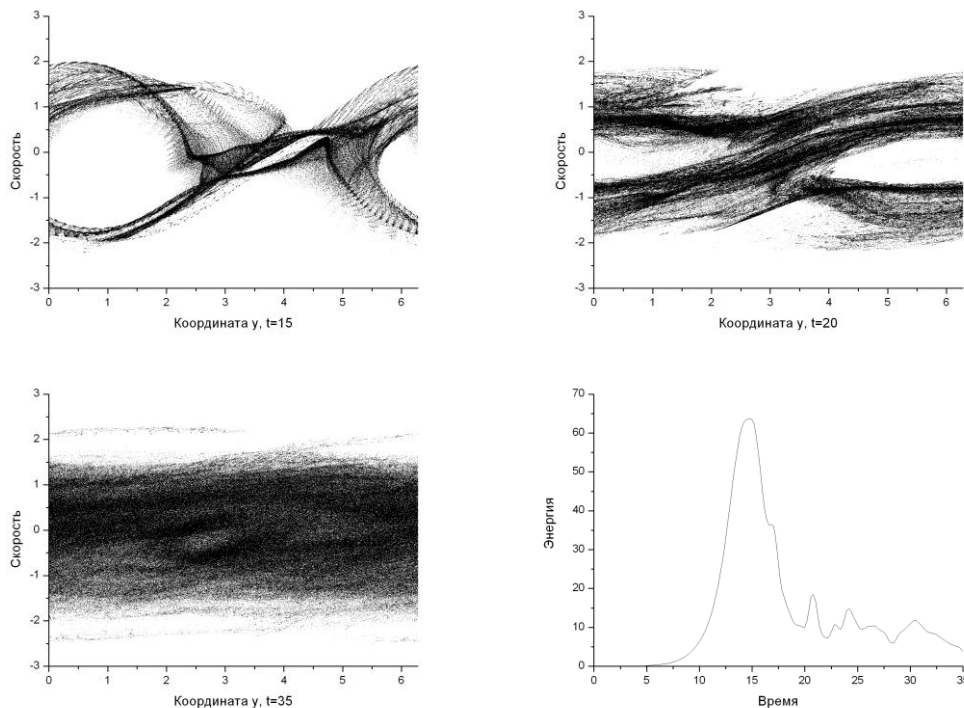


Рис.3. Пример расчета двухпотоковой электрон-электронной неустойчивости для трех измерений

Во всех трех случаях энергия поля сначала плавно нарастает до теплового уровня, а потом экспоненциально увеличивается до уровня насыщения.

Наиболее заметное физическое различие существует между случаями одномерного и двумерного моделирования. В одномерном случае образуется устойчивый вихрь, а энергия поля после стадии насыщения уменьшается до уровня, соответствующего этой стационарной структуре. Если L велико, то происходит дальнейшее перемешивание, а энергия выходит на стационарное соответственно более низкое значение. Таким образом, энергия поля не возвращается к своему тепловому уровню. В двумерном случае завихрение начинает формироваться в момент насыщения, но не сформировывается полностью и фактически исчезает в конце (рис. 2). Соответственно, энергия поля достигает насыщения в этом случае при более низком уровне, чем в одномерном случае. В трехмерном случае эти отличия становятся еще более резко выражены по сравнению с двумерным моделированием.

Из полученных расчетов видно, что наибольшее различие существует между результатами одномерных и двумерных расчетов, что указывает на важную роль пространственных факторов в развитии нелинейной стадии плазменных неустойчивостей. Поэтому при исследовании сложных кинетических процессов в плазме необходимо учитывать пространственный фактор, так как результаты для одного, двух и трех измерений могут значительно отличаться.

Полученные результаты хорошо согласуются с выводами, полученными другими авторами [5].

1. Бэдсел Ч., Ленгдон А. Физика плазмы и численное моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1989. 452 с.

2. Григорьев Ю.Н., Вшивков В.А., Федорук М.П. Численное моделирование методами частиц-в-ячейках. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2004. 360 с.

3. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. М.: Мир, 1987. 640 с.
4. Иванов М.Ф., Гальбут В.А. Численное моделирование динамики газов и плазмы методами частиц. М.: МФТИ, 2000. 168 с.
5. Морз Р. Моделирование многомерной плазмы с помощью метода частиц в ячейке. // Вычислительные методы в физике плазмы. М.: Мир, 1974. С.213-241.