



Math-Net.Ru

All Russian mathematical portal

V. V. Arsenin, Possibility of suppressing ionization
instability of
a magnetized weakly ionized nonisothermal plasma
by means of a system of feedbacks,
TVT, 1970, Volume 8, Issue 6, 1285–1286

<https://www.mathnet.ru/eng/tvt7879>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that
you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.173

July 12, 2025, 16:30:43



КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 533.951

**О ВОЗМОЖНОСТИ ПОДАВЛЕНИЯ ИОНИЗАЦИОННОЙ
НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЗАМАГНИЧЕННОЙ СЛАБО ИОНИЗОВАННОЙ
НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ СИСТЕМОЙ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ**

В. В. Арсенин

По современным представлениям ионизационная неустойчивость токонесущей неизоТЕРМИЧЕСКОЙ плазмы в магнитном поле [1, 2] ответственна за уменьшение проводимости в МГД-генераторе с горячими электронами. Для лабораторных установок типа [3] подавление неустойчивости обратными связями дало бы возможность поставить прямые эксперименты по проверке линейной и нелинейной теорий. Быстрое выключение стабилизирующей системы, например, позволяет запускать в данный момент отдельные методы колебаний и проследить их развитие от малого начального возмущения до турбулентной стадии. Подобные эксперименты с помощью обратных связей проведены недавно по желобковой [4] и дрейфовой [5] неустойчивостям.

Для стабилизации предлагается вводить в плазму электронные источники контролируемой интенсивности, пропорциональной возмущению концентрации [6, 7]. Способы реализации источников (дополнительной ионизации) здесь не обсуждаются.

Пусть через слабо ионизованную плазму концентрации n_0 в однородном магнитном поле $\mathbf{H} \parallel z$ течет ток плотности $\mathbf{j}_0(0, j_0, 0)$. Рассмотрим ее двумерные (возмущения в виде $\exp(ik_x x + ik_y y - i\omega t)$) электростатические квазинейтральные колебания в предположении, что теплопроводностью можно пренебречь, электронная температура T много больше температуры тяжелых частиц и в каждый момент имеет место локальное ионизационное равновесие. Колебания описываются следующей системой уравнений для T , электронной концентрации n , электрического поля \mathbf{E} , плотности тока \mathbf{j} ($\mathbf{j} \perp \mathbf{H}$):

1) условие потенциальности

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0, \tag{1}$$

2) условие квазинейтральности

$$\text{div } \mathbf{j} = 0, \tag{2}$$

3) уравнение Саха

$$n^2 / (n_g - n) = \text{const } T^{3/2} \exp(-I / T), \tag{3}$$

4) обобщенный закон Ома

$$\sigma \left[\mathbf{E} + \frac{T}{e} \nabla n + \left(\delta - \frac{3}{2} \right) \nabla \frac{T}{e} \right] = \mathbf{j} + [\mathbf{j} \Omega] \tau, \tag{4}$$

5) уравнение баланса энергии для электронов. В отсутствие «сторонних» (не связанных с нагревом поперечными токами) источников оно имеет вид

$$\mathbf{E} \mathbf{j} = I \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (nT) - \mathbf{j} \delta \nabla \frac{T}{e} + \kappa \frac{nT}{\tau},$$

а при наличии источников интенсивности S

$$\mathbf{E} \mathbf{j} = I \left(\frac{\partial n}{\partial t} - S \right) + \frac{3}{2} \frac{\partial}{\partial t} (nT) - \mathbf{j} \delta \nabla \frac{T}{e} + \kappa \frac{nT}{\tau}, \tag{5}$$

поскольку на рождение электронов из источников джоулево тепло поперечного тока не расходуется.

Здесь n_g — концентрация ионизирующейся компоненты (присадки), I — потенциал ионизации в энергетических единицах, σ — проводимость, $\Omega = \mathbf{H} \Omega / H$, Ω — циклотронная частота, τ — время свободного пробега электронов, δ — функционал зависи-

мости длины свободного пробега электрона от скорости (из конечного результата это число выпадает), κ — доля энергии электрона, теряемая при одном соударении.

Будем предполагать, что некоторая радиотехническая система из датчиков и усилителей поддерживает условие

$$S = -\Delta(\omega)(n - n_0). \quad (6)$$

Функция $\Delta(\omega)$ характеризует радиосхему.

После линеаризации системы (1)–(6) получается дисперсионное уравнение (ср. [8])

$$\omega = \left[\frac{\mathbf{kj}_0}{en_0} \frac{T}{I} \frac{v(1-x)^{-3/2}}{(v+3/2)(1-x)} - \frac{2ix}{\tau} \frac{T}{I} \left(\frac{k_x k_y}{k^2} \Omega\tau + F \right) - i\Delta(\omega) \right] \left[1 + \frac{3}{2v} \left(1 + \frac{\partial \ln T}{\partial \ln n} \right) \right]^{-1}, \quad (7)$$

где $x = \frac{n_0}{n_g}$ — степень ионизации присадки, $v = \frac{I}{T}$, $\frac{\partial \ln T}{\partial \ln n} = \frac{(2-x)}{(v+3/2)(1-x)}$,

$$F(\mathbf{k}) = \frac{k_x^2}{k^2} - \frac{k_y^2}{k^2} \frac{\partial \ln \tau}{\partial \ln n} + \frac{1}{2} \frac{\partial \ln T}{\partial \ln n}.$$

При $\Delta = 0$ раскачка происходит (на волнах $k_x k_y < 0$), если

$$\frac{|k_x k_y|}{k^2} \Omega\tau > F. \quad (8)$$

При $\Omega\tau \sim 1$ инкремент γ порядка $T\kappa\Omega/I \sim T\Omega_i/I_2$, Ω_i — циклотронная частота тяжелых частиц. Из-за пренебрежения теплопроводностью в (7) отсутствует масштаб длины. Теплопроводность оказывает стабилизирующее влияние на коротковолновые возмущения. В эксперименте [3] первыми по мере повышения $\Omega\tau$ раскачиваются волны с длиной порядка размеров плазмы.

Наша задача — подобрать такую функцию $\Delta(\omega)$, чтобы и при соблюдении (8) колебания были устойчивыми. Ограничимся простым случаем, когда в области $|\omega| \leq \Omega_i$ величина Δ не зависит от ω . Условием устойчивости будет

$$\frac{I\tau}{2\kappa T} \operatorname{Re} \Delta + F > -\frac{k_x k_y}{k^2} \Omega\tau. \quad (9)$$

Если стабилизирующая система реагирует не на возмущение концентрации, а на возмущение какой-либо другой величины a (например, электрического потенциала или одной из компонент электрического поля): $S = -\Delta_a \delta a$, то достаточным условием устойчивости будет $\operatorname{Re}(\Delta_a da/dn) \geq \operatorname{Re} \Delta$, где $\operatorname{Re} \Delta$ удовлетворяет (9), da/dn находится из уравнений (1)–(4).

Отметим еще возможность управлять скоростью волн, варьируя мнимую часть Δ (фазовый сдвиг).

Автор благодарит А. В. Недоспасова за полезные обсуждения.

Институт атомной энергии
им. И. В. Курчатова

Поступило в редакцию
16 I 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. П. Велихов, А. М. Дыхне. Докл. на VI междунар. конференции по ионизационным явлениям в газах. Париж, 1963.
2. А. А. Веденов, Е. П. Велихов. МГД-генераторы. Тр. междунар. симпозиума по производству электроэнергии с помощью МГД-генераторов, Зальцбург, 1966, 1, 5, 1967.
3. В. Н. Белоусов, В. В. Елисеев, И. Я. Шипук. МГД-генераторы. Тр. междунар. симпозиума по производству электроэнергии с помощью МГД-генераторов, Зальцбург, 1966, 1, 67, 1967.
4. Yu. N. Dnestrovskii, D. P. Kostomarov, V. I. Telegin, D. A. Panov, V. A. Chuyanov. Plasma Physics, 11, 691, 1969.
5. A. Y. Wong, F. Hai. Phys. Rev. Letters, 23, 163, 1969.
6. T. C. Simonen, T. K. Chu, H. W. Hendel. Phys. Rev. Letters, 23, 568, 1969.
7. Н. Р. Furth. Докл. на междунар. симпозиуме по удержанию джоуля плазмы в замкнутых системах, Дубна, 1969.
8. А. В. Недоспасов. Успехи физ. наук, 94, 439, 1968.