

Физика

**REPORTS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

ISSN 2224-5227

Volume 5, Number 303 (2015), 5 – 11

UDC 533.9.01

ABSORPTION CROSS SECTIONS OF PROTONS AND ELECTRONS BY A POLARIZABLE DUST PARTICLE IN A PLASMA

A.E. Davletov*, L.T. Yerimbetova, A. Kisan, Ye.S. Mukhametkarimov

al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan

askar@physics.kz

Key words: dusty plasma, absorption cross sections, the orbital motion limited approximation.

Abstract. In dusty plasmas one of the most important characteristics of micron-sized particles, called dust grains, is their electrical charge that can reach tens or even thousands of the elementary. The electric charge of a dust can be calculated in the standard version of the orbital motion limited approximation in which it is believed that the interaction of plasma electrons and ions with the dust particle is purely Coulomb. In this paper, it is proposed to take into account the polarization effects, which can be done, in particular, using the charge image method. This means that the dust particles are made of conductive material, however, the polarization effects will affect the charge of the dust particle, regardless of the material from which they are made. Absorption cross sections of electrons and ions by a dust particle are calculated and their dependence is investigated on the charge of the dust particle and the plasma coupling parameter.

УДК 533.9.01

СЕЧЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ ПОЛЯРИЗУЕМОЙ ПЫЛЕВОЙ ЧАСТИЦЕЙ В ПЛАЗМЕ

А.Е. Давлетов, Л.Т. Еримбетова, А. Кисан, Е.С. Мухаметкаримов

Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

Ключевые слова: пылевая плазма, сечение поглощения, приближение ограниченного орбитального движения.

Аннотация. В пылевой плазме одной из самых важных характеристик частиц микронного размера, называемых пылинками, является их электрический заряд, который может достигать десятков и даже тысяч элементарных. Электрический заряд пылинки можно рассчитать в стандартной версии приближения ограниченного орбитального движения, в котором считается, что взаимодействие электронов и ионов плазмы с пылевой частицей является чисто кулоновским. В данной работе предлагается учитывать еще и эффекты поляризации, что может быть сделано, в частности, использованием метода электростатических изображений. Это подразумевает, что пылинки изготовлены из проводника, тем не менее, поляризационные эффекты будут сказываться на заряде пылевых частиц вне зависимости от материала, из которого они изготовлены. Рассчитаны сечения поглощения электронов и ионов пылевой частицей и исследована их зависимость от заряда пылинки и параметра связи плазмы.

Введение. В пылевой плазме одной из самых важных характеристик частиц микронного размера, называемых пылинками, является их электрический заряд, который может достигать десятков и даже тысяч элементарных [1]. Это обычно приводит к тому, что пылевая компонента плазмы является сильно неидеальной системой, в которой средняя потенциальная энергия взаимодействия порядка или превышает тепловую энергию [2]. В такой ситуации вполне очевидно, что физически значимые свойства

пылевой компоненты полностью определяются потенциальной энергией взаимодействия пылинок, которая в значительной степени зависит от их заряда [3].

При обычных условиях пылевые частицы, помещенные в плазменную среду, приобретают отрицательный электрический заряд [4]. Это объясняется тем, что в начальный момент времени поток электронов плазмы на поверхность пылинки значительно превышает поток ионов, так как соответствующие подвижности сильно различаются по порядку величины. Постепенно заряжаясь, пылевая частица начинает отталкивать электроны и притягивать ионы, что в конце концов приводит к обращению суммарного потока заряда на поверхность пылинки в ноль. Этим условием и определяется установившийся равновесный заряд пылевых частиц, который может быть вычислен, например, в так называемом приближении ограниченного орбитального движения [5].

В стандартной версии приближения ограниченного орбитального движения считается [6], что взаимодействие электронов и ионов плазмы с пылевой частицей является чисто кулоновским. В данной работе предлагается учитывать еще и эффекты поляризации, что может быть сделано, в частности, использованием метода электростатических изображений [7]. Это не подразумевает, что пылинки изготовлены из проводника, так как поляризационные эффекты будут сказываться на заряде пылевых частиц вне зависимости от материала, из которого они изготовлены.

Параметры плазмы

В работе рассматривается буферная плазма с концентрацией электронов n_e и протонов $n_p = n_e = n$, в которую помещена одна сферическая частица радиуса R , электрический заряд которой равен $-Z_d e$. Так как пылевая частица является уединенной, то она не влияет на нейтральность буферной плазмы, что приводит к выполнению условия $n_e = n_p = n$.

Состояние электронной компоненты буферной плазмы описывается параметром плотности:

$$r_s = \frac{a}{a_B}, \quad (1)$$

где $a = (3/4\pi n)^{1/3}$ – среднее расстояние между частицами, $a_B = h^2 / m_e e^2$ – первый боровский радиус, h – постоянная Планка, e – элементарный заряд.

Другой безразмерный параметр, описывающий состояние буферной плазмы, называется параметром неидеальности и определяется выражением:

$$G = \frac{e^2}{a k_B T}, \quad (2)$$

Где k_B – постоянная Больцмана, T – температура среды. Следует отметить, что параметр неидеальности (2) является общепринятым и представляет собой отношение средней кулоновской энергии взаимодействия электронов к их средней энергии хаотического теплового движения.

Для учета конечности размера пылевых частиц введем параметр

$$D = \frac{a}{R}. \quad (3)$$

который показывает во сколько раз среднее расстояние между частицами буферной плазмы меньше радиуса пылевой частицы.

Отметим, что для определения заряда пылевых частиц в классическом случае достаточно знания лишь одного параметра

$$\Gamma_R = \frac{e^2}{R k_B T} = D \Gamma. \quad (4)$$

Сечение поглощения протонов. Рассмотрим взаимодействие протона со сферической пылевой частицей, которая сделана из проводящего вещества. Для учета эффектов поляризации пылинки, определим потенциальную энергию взаимодействия с помощью метода электростатических изображений, который дает [7]:

$$U_{dp}(r) = -\frac{Z_d e^2}{r} - \frac{e^2 R^3}{2r^2(r^2 - R^2)}. \quad (5)$$

Рассмотрим процесс поглощения пылевой частицей протона с некоторой фиксированной энергией E и прицельным параметром ρ , который, как известно [8], в данном случае определяется эффективной потенциальной энергией

$$U_{dp}^{eff}(r, \rho, E) = -\frac{Z_d e^2}{r} - \frac{e^2 R^3}{2r^2(r^2 - R^2)} + E \frac{\rho^2}{r^2}. \quad (6)$$

При прицельном параметре $\rho = 0$, эффективная потенциальная энергия взаимодействия протона с пылевой частицей является монотонно возрастающей функцией расстояния между ними, всюду отрицательна и стремится к $-\infty$ при приближении протона к поверхности пылевой частицы. Такие протоны, очевидно, поглощаются пылинкой. При фиксированной энергии и увеличении прицельного параметра на кривой эффективной потенциальной энергии появляется максимум, величина которого растет с увеличением ρ . При малых значениях прицельного параметра протоны будут поглощаться пылевой частицей, но при некотором значении ρ_{dp} величина максимума эффективной потенциальной энергии сравняется с полной энергией протона и произойдет его отражение от этого максимума. Очевидно, что это значение ρ_{dp} и определяет сечение поглощения, равное $\sigma_{dp} = \pi \rho_{dp}^2$. Это продемонстрировано на рисунке 1, из которого видно, что протон с энергией $E/k_B T = 1$ и прицельными параметрами $\rho = 0$ и $\rho = 1$ поглощается пылевой частицей, а при прицельном параметре $\rho = 2$ – отражается. Значению $\rho \approx 1.6$ соответствует черная линия на рисунке 1, которая разделяет области поглощения и отражения протона пылевой частицей.

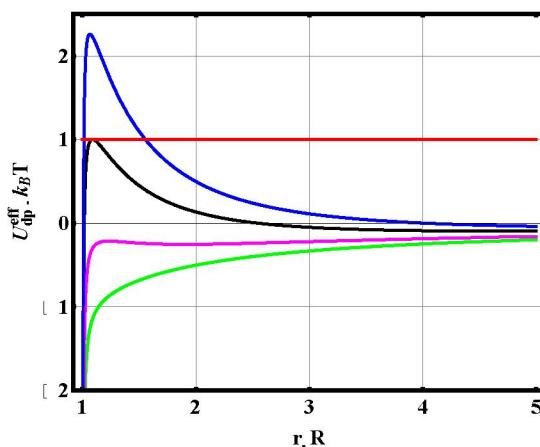


Рисунок 1 – Движение протона с полной энергией $E/k_B T = 1$ в центрально-симметричном поле пылевой частицы и разными значениями прицельного параметра при $\Gamma_R = 0.1$ и $Z_d = 10$. Зеленая линия: $\rho = 0$; пурпурная линия: $\rho = 1$; черная линия: $\rho \approx 1.6$ – соответствует критическому значению, при котором начинается отражение протона пылевой частицей; синяя линия: $\rho = 2$; красная линия: полная энергия частицы $E/k_B T = 1$.

Таким образом, ρ_{dp} находится из следующего условия

$$\max U_{dp}^{eff}(r, \rho_{dp}, E)_{r \geq R} = E. \quad (7)$$

Численное решение уравнения (7) выглядит следующим образом. При фиксированном значении энергии E надо найти такое $\rho = \rho_{dp}$, чтобы максимум на кривой эффективной потенциальной энергии (6) в точности был равен полной энергии E .

На рисунках 2 и 3 показаны зависимости сечения поглощения σ_{dp} от энергии налетающего протона при различных значениях заряда пылевых частиц и параметра связи плазмы Γ_R . Видно, что с увеличением заряда пылинки и параметра связи буферной плазмы сечение поглощения протонов возрастает.

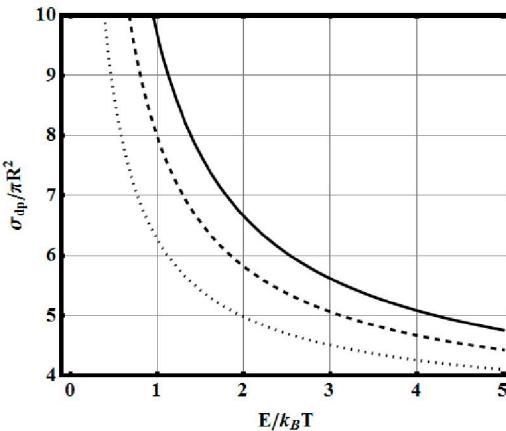


Рисунок 2 – Зависимость сечения поглощения протонов пылевой частицей от энергии налетающего протона при $\Gamma_R = 0.1$. Точечная линия: $Z_d = 5$; штриховая линия: $Z_d = 10$; сплошная линия: $Z_d = 15$.

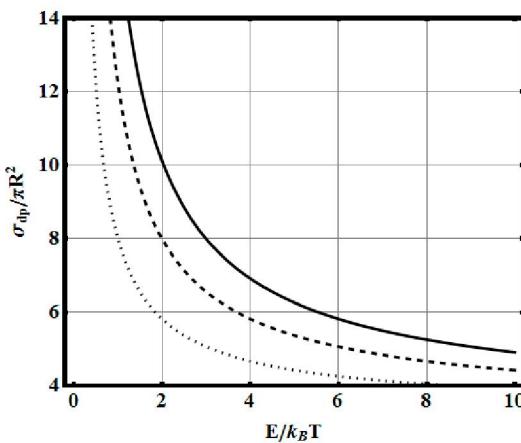


Рисунок 3 – Зависимость сечения поглощения протонов пылевой частицей от энергии налетающего протона при $Z_d = 10$. Точечная линия: $\Gamma_R = 0.1$; штриховая линия: $\Gamma_R = 0.2$; сплошная линия: $\Gamma_R = 0.3$.

Сечение поглощения электронов. Рассмотрим взаимодействие электрона со сферической пылевой частицей, которая сделана из проводящего вещества. Для учета эффектов поляризации пылевой частицы, определим потенциальную энергию взаимодействия с помощью метода электростатических изображений, который дает [см. 7]

$$U_{de}(r) = \frac{Z_d e^2}{r} - \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \right) \frac{e^2 R^3}{2r^2(r^2 - R^2)}. \quad (8)$$

Для взаимодействия электрона с пылевой частицей есть существенное отличие, которое состоит в том, что ввиду взаимного отталкивания поглощение возможно только при достижении критической энергии, определяемой выражением

$$E_c = \max U_{de}(r). \quad (9)$$

На рисунках 4 и 5 показана зависимость критической энергии от величины заряда пылевой частицы и параметра связи буферной плазмы. Обе зависимости являются практически линейными.

Рассмотрим процесс поглощения электрона с некоторой фиксированной энергией E и прицельным параметром ρ пылевой частицей, который в данном случае определяется эффективной потенциальной энергией

$$U_{dpe}^{eff}(r, \rho, E) = \frac{Z_d e^2}{r} - \frac{e^2 R^3}{2r^2(r^2 - R^2)} + E \frac{\rho^2}{r^2}. \quad (10)$$

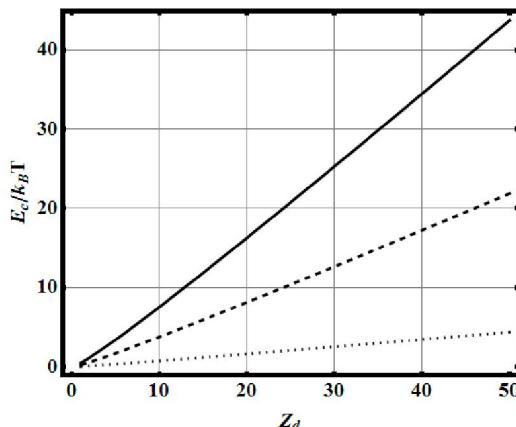


Рисунок 4 – Зависимость критической энергии электрона от заряда пылевой частицы. Точечная линия: $\Gamma_R=0.1$; штриховая линия: $\Gamma_R=0.5$; сплошная линия: $\Gamma_R=1.0$.

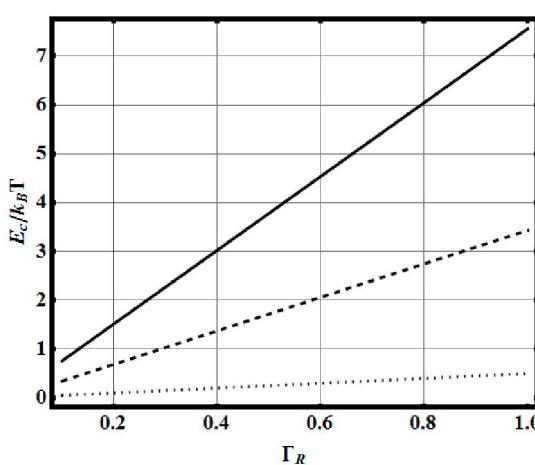


Рисунок 5 – Зависимость критической энергии электрона от параметра связи. Точечная линия: $Z_d=1$; штриховая линия: $Z_d=5$; сплошная линия: $Z_d=10$.

При прицельном параметре $\rho=0$ электроны поглощаются пылевой частицей, только если они имеют энергию выше критической, так как на кривой потенциальной энергии имеется максимум. При фиксированной энергии величина максимума на кривой эффективной потенциальной энергии (10) растет с увеличением прицельного параметра ρ , а значит при некотором значении ρ_{de} произойдет отражение электрона от максимума. Это значение ρ_{de} и определяет сечение поглощения, равное $\sigma_{de}=\pi\rho_{de}^2$. Это продемонстрировано на рисунке 6, из которого видно, что электрон с энергией $E/k_B T=5$ и прицельными параметрами $\rho=0$ и $\rho=0.5$ поглощается пылевой частицей, а при прицельном параметре $\rho=1.4$ – отражается. Значению $\rho \approx 1$ соответствует черная линия на рисунке 6, которая разделяет области поглощения и отражения электрона пылевой частицей.

Таким образом, ρ_{de} находится из следующего условия

$$\max_{r \geq R} U_{de}^{eff}(r, \rho, E) = E. \quad (11)$$

Численное решение уравнения (11) выглядит следующим образом. При фиксированном значении энергии $E > E_c$ надо найти такое $\rho = \rho_{de}$, чтобы максимум на кривой эффективной потенциальной энергии (10) в точности был равен полной энергии E .

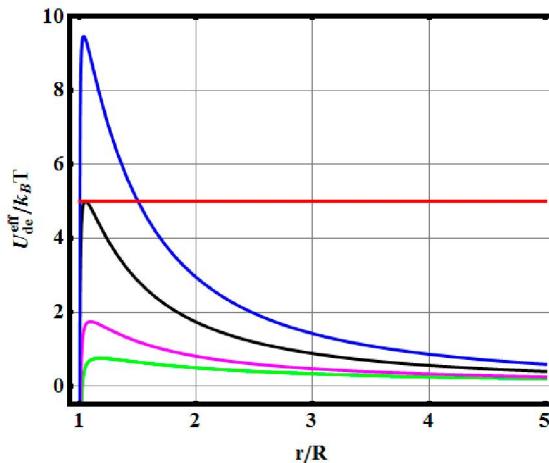


Рисунок 6 – Движение электрона с полной энергией $E/k_B T=5$ в центрально-симметричном поле пылевой частицы и разными значениями прицельного параметра при $\Gamma_R=0.1$ и $Z_d=10$. Зеленая линия: $\rho=0$; пурпурная линия: $\rho=0.5$; черная линия: $\rho \approx 1$ – соответствует критическому значению, при котором начинается отражение электрона пылевой частицей; синяя линия: $\rho=1.4$; красная линия: полная энергия частицы $E/k_B T=5$.

На рисунках 7 и 8 показаны зависимости сечения поглощения σ_{de} от энергии налетающего электрона при различных значениях заряда пылевых частиц и параметра связи плазмы Γ_R . Видно, что с увеличением заряда пылинки и уменьшения параметра связи буферной плазмы сечение поглощения протонов возрастает.

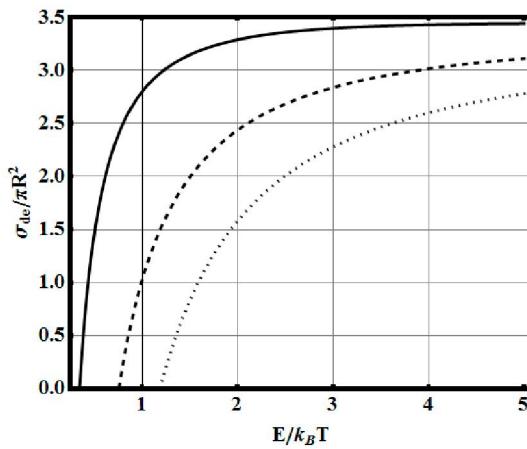


Рисунок 7 – Зависимость сечения поглощения электронов пылевой частицей от энергии налетающего протона при $\Gamma_R=0.1$. Точечная линия: $Z_d=5$; штриховая линия: $Z_d=10$; сплошная линия: $Z_d=15$.

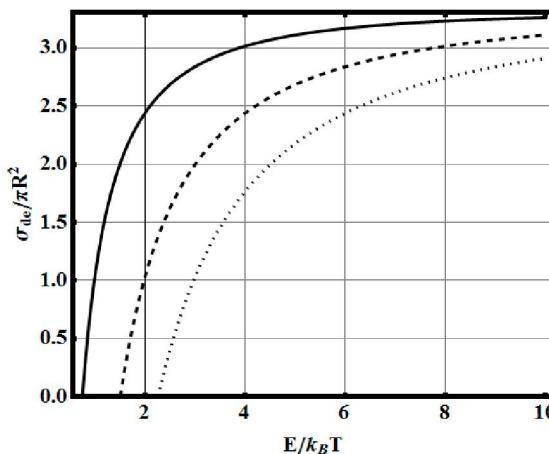


Рисунок 8 – Зависимость сечения поглощения электронов пылевой частицей от энергии налетающего протона при $Z_d=10$. Точечная линия: $\Gamma_R=0.3$; штриховая линия: $\Gamma_R=0.2$; сплошная линия: $\Gamma_R=0.1$.

Заключения и выводы. В данной работе изучены сечения поглощения протонов и электронов плазмы помещенной в нее поляризумой пылевой частицей. Рассмотрение ведется на основе метода ограниченного орбитального движения, который предполагает независимость движения плазменных частиц в электрическом поле заряженной пылинки. Продемонстрировано, что эффекты поляризации приводят к существенной модификации расчета по методу ограниченного орбитального движения.

Считается, что пылевая частица заряжена отрицательно, а это ведет к отталкиванию электронов и притяжению протонов плазмы. Как результат, поглощение электронов пылевой частицей происходит только при достижении ими некоторой критической энергии, линейно зависящей от заряда пылинки и параметра связи плазмы. Установлено, что сечения поглощения протонов и электронов пылевой частицей сильно зависят от ее заряда и параметра связи буферной плазмы. В частности, сечение поглощения протонов растет с увеличением заряда пылевой частицы и параметра связи плазмы, что объясняется их взаимным притяжением. Противоположная картина наблюдается для поглощения электронов, которые отталкиваются пылевой частицей.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН РК по программе грантового финансирования научных исследований, грант 3120/ГФ4.

REFERENCES

- [1] Piel A., Schmidt C. Dust charging and charge fluctuations in a weakly collisional radio-frequency sheath at low pressure, *Phys. Plasmas*, **2015**, Vol. 22, P. 053701(in Eng.).
- [2] Tolias P., Ratynskaya S., de Angelis U. Soft mean spherical approximation for dusty plasma liquids: One-component Yukawa systems with plasma shielding, *Phys. Rev. E*, **2014**, Vol. 90, P. 053101(in Eng.).
- [3] Khrapak S.A., Thomas H.M. Practical expressions for the internal energy and pressure of Yukawa fluids, *Phys. Rev. E*, **2015**, Vol. 90, P. 023108 (in Eng.).
- [4] Rizopoulou N., Robinson A.P.L., Coppins M., Bacharis M. Charging of large dust grains in flowing plasmas, *Phys. Rev. E*, **2015**, Vol. 91, P. 063103(in Eng.).
- [5] Benkadda S., Tsytovich V.N., Vladimirov S.V. *Phys. Rev. E*, **1999**, Vol. 60, P. 4708(in Eng.).
- [6] Fortov V.E., Khrapak A.G., Khrapak S.A., Molotkov V.I., Petrov O.F., Dusty plasmas, *Phys. Usp.*, Vol. 47, **2004**, P.447–492 (in Rus.).
- [7] Saranin V.A., Mayer V.V., Interaction of two charged conducting balls: theory and experiment, *Phys. Usp.*, Vol. 53, 2010, P.1067–1074 (in Rus.);
- [8] Landau L.D., Lifschitz E.M., Theoretical physics, M. Nauka, Vol. 1 (Mechanics), 1988, P.216 (in Rus.).

ПЛАЗМАДАҒЫ ТОЗАНДЫ БӨЛШЕКТЕН ПОЛЯРИЗАЦИЯЛАНГАН ЭЛЕКТРОНДАР МЕН ПРОТОНДАРДЫҢ ЖҰТЫЛУ ҚИМАСЫ

А.Е. Давлетов, Л.Т. Еримбетова, А. Кисан, Е.С. Мухаметкаримов
аль-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Казахстан

Тірек сөздер: тозанды плазма, жұтылу қимасы, шектелген орбиталық қозғалыс жұмықтауы.

Аннотация. Тозанды плазмадағы микрондық бөлшектердің ең негізгі сипаттамаларының бірі, мындалған элементар зарядына дейін жете алатын олардың электрлік заряды болып табылады. Осындай тозанды бөлшектердің электрлік зарядын шектелген орбиталық қозғалыс жұмықтауы негізінде анықтауга болады. Аталған жұмықтауда плазманың электрондары мен иондарының тозанды бөлшекпен әсерлесуі таза Кулондық деп есептелінеді. Бұл жұмыста электростатикалық кескін әдісін пайдаланып бөлшектердің әсерлесуінде қосымша поляризациялық эффекттерді де ескеру үсынылады. Жұмыста тозанды бөлшектердің өткізгіштен жасалғанына қарамастан поляризациялық эффекттердің байқалатыны сипатталады. Электрондар мен иондардың тозанды бөлшектен жұтылу қималары есептелініп, олардың тозанды бөлшектің заряды мен плазманың байланыс параметріне тәуелділігі анықталады.

Сведение об авторах

- А.Е. Давлетов**, д.ф.-м.н., профессор ҚазНУ им. аль-Фараби, askar@physics.kz, +77078180900
- Л.Е. Еримбетова**, PhD докторант физико-технического факультета ҚазНУ им. аль-Фараби, 87078334546
- А. Кисан**, ҚазНУ им. аль-Фараби, Arshynbek.kissan@gmail.com, +77026836088
- Е.С. Мухаметкаримов**, Ph.D докторант ҚазНУ им. аль-Фараби, m.c.erzhan@mail.ru, +77071102700

Поступила 27.08.2015 г.