

УДК 539.9

К.М. Туреханова, А.Б. Бақтиярова

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

СЫРТҚЫ ЭЛЕКТР ӨРІСІНДЕ ОРНАЛАСҚАН ЖАРТЫЛАЙ ИОНДАЛҒАН СУТЕКТІ КВАЗИКЛАССИКАЛЫҚ ПЛАЗМАДАҒЫ БӨЛШЕКТЕРДІҢ СОҚТЫҒЫСУ ПРОЦЕСТЕРІ

Аннотация: Инерциалды термоядролық синтезді жүзеге асыратын қондырғыларда пайдаланылатын идеал емес плазма және онда болып жатқан әртүрлі процестер көптеген жұмыстарда зерттелген. Тығыз плазманың кинетикалық, тасымалдау, термодинамикалық және оптикалық қасиеттері туралы мәлімет алуға мүмкіндік беретін зерттеу жұмыстары үлкен қызығушылық тудырады. Сыртқы электр өрісінде орналасқан плазмадағы әртүрлі ауытқулардың негізгі көзі электрондар болып табылатындықтан, соқтығысу процестерін зерттеу кезінде электрондардың зымырау құбылысын ескеру қажет. Бұл жұмыста сыртқы электр өрісінде орналасқан жартылай иондалған сутекті квазиклассикалық плазмадағы соқтығысу процестерінде кездесетін электрондардың зымырау құбылысы қарастырылған. Идеал емес классикалық және квазиклассикалық модельдер негізінде бөлшектердің үйкеліс күшінің байланыс және тығыздық параметрлерінен тәуелділіктері және электр өрісінің критикалық кернеуліктері анықталған. Эффeктивті потенциал негізінде өзара әсерлесетін бөлшектердің үйкеліс күші байланыс параметрінің кейбір мәндерінде төмендейтіні байқалған. Бұл байланыс параметрі ұлғайған сайын бөлшектердің шашырау қимасының төмендеуімен байланысты. Тығыз плазманың псевдопотенциалды моделі негізінде алынған критикалық кернеуліктің мәндері Дебай потенциалы негізінде алынған мәндерге қарағанда төмен орналасқан.

Соңғы жылдары идеал емес плазманы зерттеу қарқынды дамып жатқан ғылыми бағыт. Идеал емес квазиклассикалық плазманы эксперименталды және теориялық әдіспен зерттеу күрделі объект болып табылса да, әр түрлі қасиеттерінің эксперименталды зерттеулері бойынша көптеген мәліметтер жинақталған. Біртекті электр өрісінде орналасқан электрондардың соқтығысуының модельденуі қарастырылған [1]. Электронның стационарлы тасымалдауын сипаттау үшін MATLAB әдісінің көмегімен тасымалдау коэффициенттері, реакция жылдамдығы және энергия бойынша электрондардың үлестірілу функциясы есептелініп, плазма бөлшектерінің кулондық соқтығысу процестері қарастырылған [2]. Плазмадағы бөлшектердің кулондық соқтығысу процесін есептеу әдісі көрсетіле отырып, біртекті аргон плазмасы үшін электрондардың энергия бойынша үлестірілу функциясына соқтығысу процестерінің әсері келтірілген. Жоғары энергиялы электрондар серпімсіз соқтығысу салдарынан энергиясын жоғалтатындықтан, электрондардың энергия

бойынша үлестірілу функциясы Максвелл үлестірілуіне ұмтылмайтыны көрсетілген. Тасымалдау процестерін зерттеу үшін Монте-Карло кинетикалық моделі ұсынылған [3]. Монте-Карло соқтығысу операторы кулондық шашырау моделіне, сонымен қатар импульс моменті және энергияның сақталу заңдары орындалатын жаңа алгоритмге негізделген. Жартылай иондалған плазмадағы электрондардың тасымалдану процестері талданған [4], электрондардың атомдармен және молекулалармен серпімсіз соқтығысуы көрсетілген. Тұтқырлық, жылу және электрөткізгіштік сияқты электрондардың тасымалдану коэффициенттері үшін жалпыланған момент әдісін қолдану арқылы электрондар тасымалдануының скалярлы, векторлы және тензорлы теңдеулері алынған.

Берілген жұмыста бөлшектердің тығыздығы $n = n_e + n_i + n_a = (10^{17} \div 10^{23}) \text{ cm}^{-3}$ және температурасы $T = (10^4 \div 10^6) \text{ K}$ жартылай иондалған плазма қарастырылған, сонымен қатар жүйені

сипаттайтын өлшемсіз параметрлер: байланыс параметрі $\Gamma = e^2 / (ak_B T)$; тығыздық параметрі $r_s = a / a_B$ қолданылған. Мұндағы a, r_D, a_B - бөлшектер арасындағы орташа қашықтық, сәйкесінше Дебай және Бор радиустары. Төмен тығыздықтарға сәйкес келетін, идеал емес плазмадағы бөлшектердің әсерлесуі Дебай-Хюккель потенциалымен жақсы сипатталады:

$$\Phi_{ab}(r) = \frac{e_a e_b}{r} \exp\left(-\frac{r}{r_D}\right) \quad (1)$$

Аталған жұмыста жартылай иондалған квазиклассикалық плазмадағы зарядталған бөлшектердің өзара әсерлесуін сипаттау үшін коллективті эффектілерді және бөлшектердің кванттық дифракция эффектілерін ескеретін эффективті псевдопотенциал қолданылған [5]:

$$\Phi_{\alpha\beta}(r) = \frac{Z_\alpha Z_\beta e^2}{\sqrt{1 - 4\lambda_{\alpha\beta}^2 / r_D^2}} \left(\frac{e^{-Br}}{r} - \frac{e^{-Ar}}{r} \right), \quad (2)$$

мұндағы $A^2 = \frac{1}{2\lambda^2} \left(1 + \sqrt{1 - \lambda_{\alpha\beta}^2 / r_D^2} \right)$, $B^2 = \frac{1}{2\lambda^2} \left(1 - \sqrt{1 - \lambda_{\alpha\beta}^2 / r_D^2} \right)$, $Z_\alpha e, Z_\beta e$ - α және β бөлшектердің электрлік зарядтары, $\lambda_{\alpha\beta} = h / \sqrt{2\pi m_{\alpha\beta} k_B T}$ - де-Бройль ұзындығы, $m_{\alpha\beta} = m_\alpha m_\beta / (m_\alpha + m_\beta)$ - α және β бөлшектердің келтірілген массасы, $r_D = \left(k_B T / \left(4\pi e^2 \sum_j n_j Z_j^2 \right) \right)^{1/2}$ - Дебай радиусы.

Зарядталған бөлшектердің атомдармен өзара әсерлесуінде поляризация эффектісі плазмадағы атқаратын рөлі маңызды екені белгілі. Берілген жұмыста «заряд-атом» әсерлесу потенциал моделі ретінде Букингем потенциалының экрандалған нұсқасы қолданылған [6]:

$$\Phi_{ea}(r) = -\frac{e^2 \alpha_D}{2(r^2 + r_0^2)^2} \exp(-2r / r_D) \cdot (1 + r / r_D)^2 \quad (3)$$

мұндағы α_D - дипольді поляризациялану, сутекті плазма үшін $\alpha_D = 4.5 a_B^3$; r_0 - экрандалған атомға тән өлшем, сутегі атомы үшін $r_0 = 1.4565 a_B$.

Сонымен қатар «заряд-атом» әсерлесуінің потенциал моделі ретінде квазиклассикалық тығыз плазма

экрандалу эффектісін және квантты-механикалық эффектіні ескеретін поляризациялық потенциал пайдаланылған [7]:

$$\Psi_{es}(r) = -\frac{e^2 \alpha}{2r^4 (1 - 4\lambda^2 / r_D^2)} \left(e^{-Br} (1 + Br) - e^{-Ar} (1 + Ar) \right)^2, \quad (4)$$

мұндағы

$$A^2 = \frac{1}{2\lambda^2} \left(1 + \sqrt{1 - 4\lambda^2 / r_D^2} \right),$$

$$B^2 = \frac{1}{2\lambda^2} \left(1 - \sqrt{1 - 4\lambda^2 / r_D^2} \right).$$

Сыртқы электр өрісінде орналасқан идеал емес плазмадағы электрондардың үдетілу процесінің себебі электрондарға әсер ететін және бөлшектердің жылдамдығы артқан сайын азаятын үйкеліс күші болып табылады. Электр өрісіндегі электрондардың орташа қозғалыс теңдеу көмегімен электрондардың зымырау шартын бағаалуға болады. Толық иондалған классикалық плазмадағы бөлшектердің үйкеліс күшін жазайық [8]:

$$F = \frac{4\pi n_e e^4}{m_e g^2} \lambda, \quad (5)$$

мұндағы λ - массалар центрі жүйесінде шашырау бұрышы арқылы анықталатын кулоновдық логарифм:

$$\lambda = \frac{1}{p_\perp^2} \int_0^{b_{\max}} \sin^2\left(\frac{\theta_c}{2}\right) \rho d\rho \quad (6)$$

мұндағы $p_\perp = ee' / \mu v^2$ - 90°-қа шашырағандағы көзделген параметр, μ - бөлшектердің келтірілген массасы, θ_c - массалар центрінің жүйесінде шашырау бұрышы, ρ - көзделген параметр.

Сыртқы электр өрісінің бағытымен қозғалатын жылдам электрондар ағыны үшін, электрондар мен нейтралды бөлшектердің соқтығысуын ескергенде үйкеліс күші келесідей жазылады:

$$F(\mathcal{G}) = F_{ei}(\mathcal{G}) + F_{ee}(\mathcal{G}) + F_{ea}(\mathcal{G}) \approx \mu_{ei} v_{ei}(\mathcal{G}) \mathcal{G} + \mu_{ee} v_{ee}(\mathcal{G}) \mathcal{G} + \mu_{ea} v_{ea}(\mathcal{G}) \mathcal{G} \quad (7)$$

мұндағы $\mu_{ei}, \mu_{ee}, \mu_{ea}$ - бөлшектердің келтірілген массасы, $v_{ea} = n \mathcal{G} \sigma'(\mathcal{G})$ - электрон-атом соқтығысуының жиілігі,

$\sigma'(g)$ - бөлшектердің тасымалдау шашырау қимасы.

Жұмыста бөлшектердің тасымалдау шашырау қимасы фазалық функция әдісінің көмегімен есептелген. Толқындық функция үшін Шредингер теңдеуін қарастыруға негізделген фазалық функция әдісі методикалық және практикалық сипаттамада артықшылықтары бар: потенциалдың белгілі бір бөлігіндегі шашырау фазасының әрбір нүктесінде болатын фазалық функцияның физикалық мағынасының көрнекілігі; сандық есептеулерді жоғары дәлдікпен жүргізуге және есептің қателігін бағалауды жеңілдетеді; әр түрлі шашырау параметрлерін есептеуде жана алгоритмдерді құруға мүмкіндік береді. Фазалық функция әдісі Шредингер теңдеуінен шашырау фазасының теңдеуіне ауысуымен анықталады. Фазалық функция әдісінің негізгі теңдеуі былай жазылады:

$$\frac{d\delta_i^{\alpha\beta}(r)}{dr} = -\frac{1}{k}U(r)[\cos \delta_i^{\alpha\beta}(r) \cdot J_l(kr) - \sin \delta_i^{\alpha\beta}(r) \cdot n_l(kr)]^2$$

$$\delta_i^{\alpha\beta}(0) = 0; \quad (8)$$

мұндағы $j_l(kr)$ және $n_l(kr)$ - Рикатти-Бессель функциялары. Мұнда фазалық ығысу $\delta_i^{\alpha\beta}$ әсерлесу потенциалының көмегімен Калоджеро теңдеуінің шешімінен алынған:

$$\delta_i^{\alpha\beta} = \lim_{r \rightarrow \infty} \delta_i^{\alpha\beta}(r)$$

Бөлшектердің тасымалдану шашырау қимасы фазалық функция әдісі арқылы келесідей есептеуге болады [9]:

$$\sigma_{ir}^{e\beta} = \frac{4\pi}{k^2} \sum_{l=0}^{\infty} (l+1) \sin^2(\delta_{l+1}^{e\beta} - \delta_l^{e\beta}) \quad (9)$$

Жүйедегі зарядталған бөлшектер әрекеттесуінен болатын ионизация потенциалының азаюын ескере отырып, жартылай иондалған сутекті плазманың құрамы Саха теңдеуінің көмегімен есептелген. Саха теңдеуі плазманың температурасы, қысымы және бөлшектердің иондалу энергиясымен анықталатын иондалу дәрежесін сипаттайды. Иондалу

дәрежесін $\alpha = \frac{n_e^*}{n_e}$ еркін электрондардың

плазмадағы электрондардың толық санына қатынасы ретінде анықтай отырып, Саха теңдеуі мына түрде жазылған:

$$\frac{1-\alpha}{\alpha^2} = n_e \lambda^3 \exp\left[\frac{I - \Delta I}{k_B T}\right], \quad (10)$$

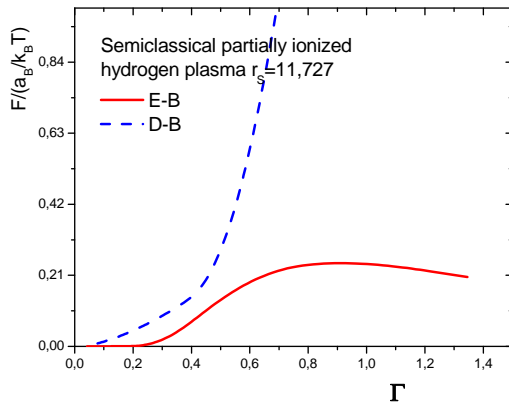
Сутегі атомы үшін иондалу энергиясы мынаған тең $I \approx 13.6$ эВ, ΔI - химиялық потенциал арқылы анықталатын иондалу потенциалының төмендеуі.

Электр күші үйкеліс күшін бағытталған жылдамдықтың ешбір мәнінде теңестіре алмағанда, электр өріс әсерінен электрондар үздіксіз үдетілу режиміне ауысады. Осындай ауысу шегін анықтайтын өрістің шегін анықтайтын критикалық кернеулігі (Дрейсер критерийі) [10]:

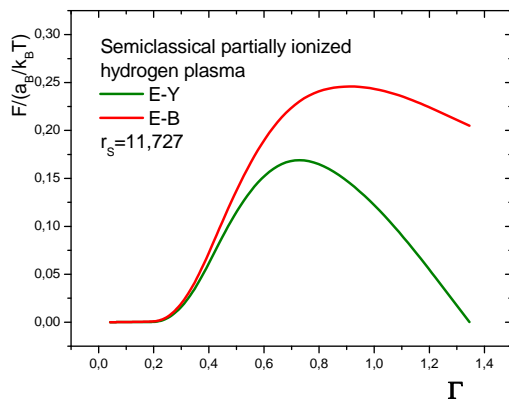
$$E_{cr} = \frac{4\pi e^3 n_e}{k_B T_e} \lambda \approx 2.6 * 10^{-13} \frac{n_e}{k_B T} \lambda \quad (11)$$

мұнда λ - кулондық логарифм [11]. Бөлшектер әсерлесуінің псевдопотенциалы арқылы кулондық логарифмді анықтай отырып, критикалық электр өрістің плазма бөлшектерінің концентрациясы және энергиясынан тәуелділігі 3-4 суретте көрсетілген.

1-суретте эффективті квазиклассикалық потенциал негізінде өзара әрекеттесетін бөлшектердің үйкеліс күшінің байланыс параметрінен тәуелділігі келтірілген. Бұл тәуелділіктен эффективті потенциал негізінде өзара әсерлесетін бөлшектердің үйкеліс күші байланыс параметрінің кейбір мәндерінде төмендейтіні байқалған. Шамасы, бұл байланыс параметрінің ұлғаюымен бөлшектердің шашырауы азаяды, яғни шашырау қимасы төмендеген. 2-суретте квантты-механикалық эффектін ескеретін поляризациялық потенциаларқылы әрекеттесетін бөлшектердің үйкеліс күші Букингем потенциалы арқылы әрекеттесетін бөлшектердің үйкеліс күшінен төмен екендігі көрініп тұр.



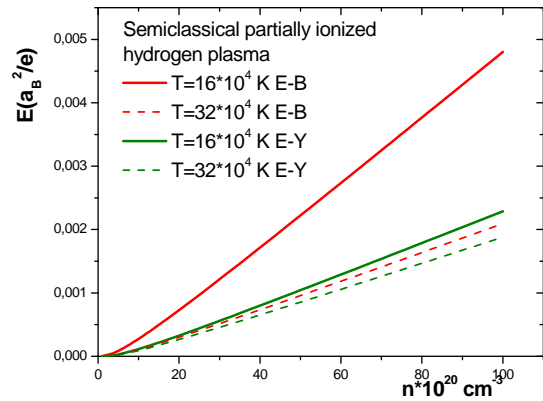
1-сурет. (2)-(3) өзара эффективті квазиклассикалық потенциалдар арқылы әрекеттесетін бөлшектерге әсер ететін $F^* = F / (k_B T / a)$ үйкеліс күшінің Γ байланыс параметрінен тәуелділігі



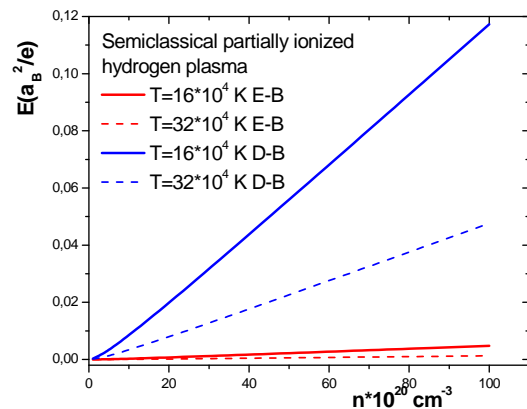
2-сурет. (2)-(4) өзара эффективті квазиклассикалық потенциалдар арқылы әрекеттесетін бөлшектерге әсер ететін $F^* = F / (k_B T / a)$ үйкеліс күшінің Γ байланыс параметрінен тәуелділігі

3-4 суретте жартылай иондалған квазиклассикалық сутекті идеал емес плазманың псевдопотенциалды модельдер негізіндегі электр өрісінің критикалық кернеуліктері көрсетілген. Тығыз плазманың псевдопотенциалды моделі негізінде алынған критикалық кернеуліктің мәндері Дебай потенциалы негізінде алынған мәндерге қарағанда төмен. Мұны кулондық әсерлесу және Дебай потенциалы арқылы әрекеттесетін бөлшектердің үйкеліс күшінен псевдопотенциалды модель негізіндегі әрекеттесетін бөлшектердің

үйкеліс күшінің белгілі жылдамдықта төмен болатындығымен түсіндіруге болады.



3-сурет. Критикалық электр өрісі эффективті псевдопотенциалды моделі негізінде жүйе температурасының әр түрлі мәндерінде бөлшектер тығыздығының функциясы ретінде



4-сурет. Критикалық электр өрісі эффективті псевдопотенциалды моделі негізінде жүйе температурасының әр түрлі мәндерінде бөлшектер тығыздығының функциясы ретінде

Қорыта келгенде, жартылай иондалған сутекті квазиклассикалық тығыз плазмадағы эффективті потенциал негізінде өзара әсерлесетін бөлшектердің соқтығысу процесіндегі үйкеліс күштері мен критикалық өрістері зерттелеген. Үйкеліс күшін байланыс параметрінің функциясы ретінде есептелген. Тығыз плазмада үздіксіз үдетілу режиміне өту шарты азғындалған плазмаға қарағанда қаталдау екені анықталған.

Пайдаланылған әдебиеттер:

1 Rabie M., Franck C.M., A Monte-Carlo collision code for the simulation of electron

transport in low temperatures plasmas //Computer Physics Communications, 2016.- Vol. 203, P. 268–277.
2 Nanbu K., Furubayashi T., Takekida. Colom collisions in materials processing plasma //Thin Solid Films, 2005.-Vol. 506–507, P. 720–723.
3 A.M. Runov, S.V. Kasilov, P. Helander. Energy and momentum preserving Coulomb collision model for kinetic Monte Carlo simulations of plasma steady states in toroidal fusion devices //Journal of Computational Physics, 2015.-Vol.300, P. 605–622.
4 Zhdanov V.M., Stepanenko A.A., Electron transport coefficients in molecular and atomic plasmas with account for inelastic collisions // Physics procedia, 2015,-Vol.71,P.110-115.

5 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N. Phys. Plasmas. 9. 3758 (2002).
6 Redmer R. Phys. Rev. E. 59, 1073 (1999).
7 Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Omarbakiyeva Yu.A., Roepke G. J. Phys.A: Math. And Gen. 39. 4369 (2006).
8 Turekhanova K.M. Phys. Plasmas. 52, No. 3, 178 – 181 (2012).
9 Gurevich A.V. JETP. 39, 1296 (1960).
10 Ramazanov T.S., Kodanova S.K. Phys. Plasmas. 8. 5049 (2001).
11 Babikov V.V. Phase function method in quantum mechanics – M.: Nauka, 1976. – 287 p.

Басылымға 25.04.17 алынды

К.М. Туреханова, А.Б. Бақтиярова

әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

СЫРТҚЫ ЭЛЕКТР ӨРІСІНДЕ ОРНАЛАСҚАН ЖАРТЫЛАЙ ИОНДАЛҒАН СУТЕКТІ КВАЗИКЛАССИКАЛЫҚ ПЛАЗМАДАҒЫ БӨЛШЕКТЕРДІҢ СОҚТЫҒЫСУ ПРОЦЕСТЕРІ

Аннотация: Инерциалды термоядролық синтезді жүзеге асыратын қондырғыларда пайдаланылатын идеал емес плазма және онда болып жатқан әртүрлі процестер көптеген жұмыстарда зерттелген. Тығыз плазманың кинетикалық, тасымалдау, термодинамикалық және оптикалық қасиеттері туралы мәлімет алуға мүмкіндік беретін зерттеу жұмыстары үлкен қызығушылық тудырады. Сыртқы электр өрісінде орналасқан плазмадағы әртүрлі ауытқулардың негізгі көзі электрондар болып табылатындықтан, соқтығысу процестерін зерттеу кезінде электрондардың зымырау құбылысын ескеру қажет. Бұл жұмыста сыртқы электр өрісінде орналасқан жартылай иондалған сутекті квазиклассикалық плазмадағы соқтығысу процестерінде кездесетін электрондардың зымырау құбылысы қарастырылған. Идеал емес классикалық және квазиклассикалық модельдер негізінде бөлшектердің үйкеліс күшінің байланыс және тығыздық параметрлерінен тәуелділіктері және электр өрісінің критикалық кернеуліктері анықталған. Эффе́ктивті потенциал негізінде өзара әсерлесетін бөлшектердің үйкеліс күші байланыс параметрінің кейбір мәндерінде төмендейтіні байқалған. Бұл байланыс параметрі ұлғайған сайын бөлшектердің шашырау қимасының төмендеуімен байланысты. Тығыз плазманың псевдопотенциалды моделі негізінде алынған критикалық кернеуліктің мәндері Дебай потенциалы негізінде алынған мәндерге қарағанда төмен орналасқан.

Туреханова Кундуз Моминовна, Бақтиярова Арайлым Бақтиярқызы

Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, аль-Фараби, 71

kunduz@physics.kz

СТОЛКНОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КВАЗИКЛАССИЧЕСКОЙ ЧАСТИЧНО-ИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЕ ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Большинство работ по физике неидеальной плазмы посвящено ее использованию в установках по осуществлению инерционного термоядерного синтеза и изучению разнообразных процессов, происходящих в плазме. Огромный интерес представляют

исследования, позволяющие получать сведения о кинетических, транспортных, термодинамических и оптических свойствах плотной плазмы. При исследовании столкновительных процессов необходимо учитывать явление убегания электронов, так как эти электроны являются основным источником различных видов неустойчивостей в плазме. В работе исследованы столкновительные процессы в квазиклассической частично-ионизированной водородной плазме, находящейся во внешнем электрическом поле. Определены зависимости силы трения от параметров связи и плотности частиц на основе псевдопотенциальных моделей, а также получены зависимости напряженности критического электрического поля от концентрации частиц плазмы. Сила трения, действующая на частицы на основе эффективного потенциала, уменьшается при некоторых значениях параметра связи. Напряженность критического электрического поля, полученная на основе псевдопотенциальной модели, меньше, чем значения для модели дебаевского потенциала. Это можно объяснить тем, что сила трения при определенных скоростях для псевдопотенциальной модели меньше, чем сила трения для потенциала Дебая и кулоновского взаимодействия

К.М. Turekhanova, A.B. Baktiyarova

Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi, 71, Almaty

kunduz@physics.kz

THE COLLISIONAL PROCESSES IN SEMICLASSICAL PARTIALLY IONIZED HYDROGEN PLASMA LOCATING IN EXTERNAL ELECTRIC FIELD

The investigation of the kinetic, transport, thermodynamic, and optical properties of dense plasmas is great of interests due to their application in many installations such as in the implementation of inertial thermonuclear fusion and etc. In present work the collision processes in a quasi-classical partially ionized hydrogen plasma situating are investigated in an external electric field. The friction force on the basis of pseudopotential models are determined as the function of coupling and density parameters. Dependencies of critical electric field on the plasma density and temperature were obtained. It is shown that if the quantum-mechanical and screening effects in dense partially ionized hydrogen plasma are taken into consideration, friction force curve for electrons has maxima. The critical electric field calculated on the basis of the pseudopotential models increases with the increase of plasma density and with the decrease of plasma temperature. This happens due to several factors: decrease of the collision frequency in dense plasma and formation of some ordered structures in dense plasma.