

Ж.Е. Онайбергенов^{1,2} , А.Е. Абдрахманов² ,

С.А. Оразбаев² , Т.С. Рамазанов² , А.У. Утегенов^{1,2*} 

¹Институт прикладных наук и информационных технологий, г.Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан

*e-mail: almasbek@physics.kz

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛАЗМЕ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПРИ ПОСТОЯННОМ ТОКЕ Ar и Ar/C₂H₂

В данной работе предоставлены результаты исследования температуры электронов в аргонной и аргон-ацетиленовой плазме тлеющего разряда постоянного тока. Для определения основного параметра комплексной плазмы был использован оптико-эмиссионный метод. Зависимость температуры электронов от рабочего давления, напряжения и времени разряда определялась по интенсивности спектральных линий. Напряжение источника варьировалось от 1 кВ до 1,5 кВ, а давление поддерживалось между 0,1–1 торр. В зависимости от времени температура электронов рассчитывалась каждые 20 секунд в течение 200 секундного разряда. Результаты показали, что в аргонной плазме с повышением давления температура электронов снижается до показателя давления 0,4 торр, последующее увеличение приводит к повышению температуры. Также с увеличением напряжения источника наблюдается снижение температуры электронов в пределах погрешности. Кроме этого, в пылевой плазме (PECVD в Ar-C₂H₂) температура электронов в зависимости от давления и напряжения источника имела тенденцию, аналогичную той, что наблюдалась в аргонной плазме. Однако температура электронов в пылевой плазме в зависимости от времени в начальный момент повышается, после резко снижается с течением времени.

Ключевые слова: пылевая плазма, температура электронов, PECVD, плазма с наночастицами, оптическая спектроскопия.

Z.E. Onaibergenov^{1,2}, A.E. Abdrakhmanov², S.A. Orazbayev², T.S. Ramazanov², A.U. Utegenov^{1,2*}

¹Institute of Applied Sciences and Information Technologies, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: almasbek@physics.kz

Investigation of the temperature of electrons in a glow discharge plasma at direct current Ar and Ar/ C₂H₂

This paper presents the results of the study of the electron temperature in argon and argon-acetylene plasma of DC glow discharge. The optical-emission method was used to determine the main parameter of the complex plasma. The dependence of the electron temperature on the operating pressure, voltage, and discharge time was determined from the intensity of spectral lines. The source voltage was varied from 1 kV to 1.5 kV, and the pressure was maintained between 0.1-1 torr. As a time-dependent function, the electron temperature was calculated every 20 seconds during a 200-second discharge. The results showed that in argon plasma, as the pressure increases, the electron temperature decreases up to a pressure value of 0.4 torr, subsequent increase leads to an increase in temperature. Also, with the increase in source voltage, a decrease in electron temperature within the error limits is observed. In addition, in dust plasma (PECVD in Ar-C₂H₂), the electron temperature as a function of pressure and source voltage showed a trend similar to that observed in argon plasma. However, the electron temperature in dust plasma increases as a function of time at the initial moment, after which it decreases sharply with time.

Key words: Dusty plasma, electron temperature, PECVD, plasma with nanoparticles, optical spectroscopy.

Ж.Е. Оңайбергенов^{1,2}, А.Е. Әбдрахманов², С.А. Оразбаев², Т.С. Рамазанов², А.У. Утегенов^{1,2*}

¹Қолданбалы ғылымдар және ақпараттық технологиялар институты, Алматы қ, Қазақстан

²Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ, Қазақстан

*e-mail: almasbek@phsyics.kz

Тұрақты токта Ar және Ar/C₂H₂ солғын разрядты плазмадағы электрондардың температурасын зерттеу

Бұл жұмыста тұрақты токтағы солғын разрядының аргон және аргон ацетилен плазмасындағы электрондардың температурасын зерттеу нәтижелері келтірілген. Күрделі плазманың негізгі параметрін анықтау үшін оптика эмиссиялық әдіс қолданылды. Электрондардың температурасының қысымнан, кернеуден және уақыттан тәуелділігі спектрлік сызықтардың интенсивтілігін талдау арқылы анықталды. Эксперимент барысында кернеу көзі 1кВ-тан 1,5кВ-қа дейін жүйелі түрде өзгертіліп отырды, ал қысым көрсеткіші тұрақты түрде 0,1-1 торр арасында сақталды. Уақыттан тәуелділігі бойынша 200 секундқа созылған солғын разрядта әр 20 секунд сайын электрондардың температурасы есептеліп отырды. Алынған нәтижелер көрсетуі бойынша аргон плазмасында қысымның жоғарылауымен электрондардың температурасы 0,4 торр қысым көрсеткішіне дейін төмендеп, содан кейін қайта көтерілетінін көрсетті. Электрондардың температурасы бөлшексіз яғни аргон плазмасында кернеу көзі жоғарылауымен қателік шегінде төмендей бастайтыны байқалды. Тозаңды плазмада (PECVD Ar-C₂H₂) жүргізілген зерттеу нәтижесін саралау барысында электрондардың температурасы қысым мен кернеу көзінен тәуелділігі аргон плазмасында байқалған тенденциялармен өте ұқсас болғаны анықталды. Бастапқы сәтте уақытқа байланысты тәуелділікте тозаңды плазмадағы электрондардың температурасы біртіндеп жоғарылай бастап, кейін уақыт өте келе күрт төмендейтінін нәтижелер көрсетті.

Түйін сөздер: тозаңды плазма, электрондар температурасы, PECVD, нанобөлшектері бар плазма, оптикалық спектроскопия.

Введение

Изучение комплексной плазмы как модели конденсированных сред в настоящее время является одним из актуальных направлений научных исследований [1, 2]. Плазма, содержащая пылевые частицы, используется для моделирования целого ряда процессов в конденсированных средах. В качестве модели сложной плазмы в исследованиях используются установки РК-4 [3, 4], РК-3 Плюс [5–7] и РКЕ Nefedov [8], которые с 2001 года по сегодняшний день использовались для экспериментов на борту Международной космической станции (МКС). В условиях микрогравитации были обнаружены различные феномены, связанные с пылевыми частицами, такие как плазменный кристалл [9–12], пылевые волны [13–16], пустоты (войд) [17–20]. Важность исследования этих явлений заключается в понимании фундаментальных физических процессов, связанных с фазовыми переходами и созданием новых материалов.

Присутствие пылевых частиц значительно влияет на ключевые параметры плазмы, такие как температура и концентрация электронов [21]. Диагностика пылевой плазмы позволяет получить полное представление о механизмах и причинах этих явлений. Существует различные методы диагностики такие как электрический зонд

Ленгмюра [22–29], лазерные интерферометры [30–33] и оптические спектрометры [26, 34–37]. Использование оптических методов для диагностики плазмы, в том числе пылевой, является надежным подходом, поскольку не влияет на плазму и на конечный результат.

Параметры электронной температуры, электронной плотности и аксиального электрического поля в зависимости от тока источника и давления в атмосфере неона с пылевыми частицами определялись с помощью зонда на экспериментальной установке РК-4 с источником постоянного тока с изменяющейся полярностью [3]. Результаты работы показывают, что с увеличением тока осевое электрическое поле и температура электронов уменьшаются, а концентрация электронов увеличивается. Осевое электрическое поле демонстрирует сложную зависимость от давления: при низких давлениях оно уменьшается, а при высоких давлениях может оставаться неизменной или увеличиваться. Однако температура электронов уменьшается с ростом давления, в то время как концентрация увеличивается [3]. В работе Антонова и др. [25], проведенном на той же экспериментальной установке, целью которого было оценить заряд пылевых частиц и сравнить скорости дрейфа частиц в условиях микрогравитации и на земле при различных параметрах и типах газа. Авторы

измеряли основные параметры без пылевой плазмы в зависимости давления на земной экспериментальной установке. Результаты показали другую зависимость температуры электронов и осевого электрического поля от давления в атмосфере аргона по сравнению с атмосферой неона. В аргоновой атмосфере электронная температура и электрическое поле увеличиваются с ростом давления. Напротив, в атмосфере неона температура электронов снижается на незначительную величину с ростом давления, а электрическое поле остается неизменным. Также наблюдалось, что плотность электронов увеличивается с ростом давления [25].

В ряде работ [31, 34, 35, 38] в которой пылевая плазма была получена путем введения химический активного газа, были определены основные параметры плазмы. В данных работах [39–41] в плазме высокочастотного емкостного разряда в смеси Ar/SiH_4 на основе зондовой диагностики были определены температура и плотность электронов в зависимости от времени. В результате исследования обнаружено, что концентрация электронов снижается с истечением времени, а температура электронов увеличивается. Gordillo-Vazquez и другие [37] определили температуру электронов с помощью оптического метода в высокочастотного емкостного разряде $\text{Ar}/\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_2$, а также $\text{Ar}/\text{H}_2/\text{CH}_4$. Результаты данной работы показали, что с повышением процентного содержания аргона температура электронов снижается, а также в атмосфере метана и аргона температура ниже, чем в атмосфере ацетилена. Авторы работы [28] измерили температуру электронов, концентрацию ионов и потенциал плазмы внутри пустоты (войда), с помощью зонда в условиях микрогравитаций. По результатам данной работы температура электронов, потенциал плазмы были выше, чем без пылевой компоненты, а плотность ионов была меньше в тех же условиях.

В представленной работе была определена температура электронов с помощью оптического метода на земной установке РК-4 Qaz, которая является аналогом РК-4 на МКС [3]. Исследована зависимость температуры электронов от напряжения и давления как в аргоновой, так и в аргон-ацетиленовой плазмы.

Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки РК-4 Qaz представлена на рисунке 1, которая состоит из П-образной боросиликатной стеклянной газоразрядной трубки (1). Трубка имеет длину 330 мм, а внутренний диаметр

составляет 25 мм. Разряд зажигается источником постоянного тока Плазон (5) между анодными (6) и катодными (7) электродами из нержавеющей стали марки 304 AISI, на расстоянии 200 мм, диаметром 20 мм и толщиной 2 мм. Воздух из камеры был выкачен с помощью роторного насоса марки Вакма 2НВР-5ДМ (2) и турбомолекулярного насоса Pfeiffer HiCube80 (3) до показателя давления 10^{-4} торр. Подача рабочего газа в систему осуществлялась с помощью регуляторов массового расхода (4) XINNOVIS S 500 со скоростью 160 куб. см для аргона и 0,6 куб. см для ацетилена. Давление системы измерялось с помощью датчика контроллера модели Edwards ADC Enhanced МКП, D39591500. В области положительного столба с использованием оптического эмиссионного спектрометра (9) модели АТР 2000 излучения измерялось в диапазоне 200–1100 нм.

Эксперимент был проведен в различных значениях давления в диапазоне 0,1–1 Торр и напряжения от 1 до 1,5 кВ. Система находилась без потоковом режиме. Процентное содержание ацетилена (C_2H_2) составляло $\sim 2\%$. После введения ацетилена с помощью спектрометра были получены спектральные линии с интервалом в 20 секунд в течение 200 секундного периода.

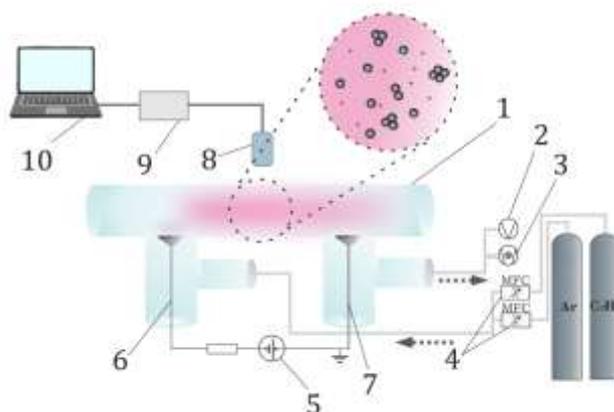


Рисунок 1 - Схема экспериментальной установки РК-4 Qaz. Газоразрядная трубка (1), роторный насос (2), турбомолекулярный насос (3), регуляторы массового расхода (4), источник постоянного тока (5), катод (6), анод (7), объектив спектрометра (8), оптический эмиссионный спектрометр (9), ноутбук (10)

Метод расчета температуры электронов

Температура электронов была рассчитана с помощью модели коронного баланса плазмы. В своей работе Fujimoto [42] утверждает, что при низких давлениях и малых плотностях электронов в разрядах типа тлеющего разряда преобладают такие процессы, как прямое возбуждение из

основного состояния и спонтанный радиационный распад. Поэтому в данном эксперименте в плазме преобладает кинетика коронно-балансной плазмы. Gordillo-Vazquez и другие в своей работе [37] представили модифицированный метод построения графика Больцмана на основе коронно-балансной модели, который был использован для расчета температуры электронов в данной работе:

$$\ln \left(\frac{I_{ij} \lambda_{ij} \sum_{i>j} A_{ij}}{A_{ij} b_{1i}} \right) = - \frac{E_{1i}}{kT_e} + const,$$

где λ_{ij} – длина волны излучающей плазмы; I_{ij} – интенсивность спектральной линии между энергетическими уровнями i и j ; A_{ij} – коэффициент вероятностного перехода для спонтанного излучения из с уровня i на более низкий j ; E_{1i} – энергия возбужденного состояния уровня i ; b_{1i} – коэффициент в экспоненциальном приближении коэффициента скорости возбуждения электронным ударом от основного состояния 1 до уровня i ; k – постоянная Больцмана; T_e – температура электронов.

Для дальнейших расчетов использовалось спектральная линия аргона на длине волны 750,38 нм со спонтанными переходами $2p \rightarrow 1s2$. Значения константы b_{1i} для линий аргона $b_{1i} = 3,508 \cdot 10^{-9}$ [26, 36, 37].

Результаты и обсуждение

Аргоновая плазма

В результате экспериментов была определена зависимость температуры электронов аргоновой плазмы от давления и напряжения источника. Результаты показали (рис. 2) что с увеличением напряжения при фиксированном давлении в 0,4 торр температура электронов линейно снижается с $\sim 0,93$ эВ до $\sim 0,9$ эВ. Представленную тенденцию можно объяснить тем, что с увеличением напряжения источника возрастает скорость ионизации, что приводит к увеличению концентрации электронов. Это, в свою очередь, увеличивает частоту столкновений электронов с нейтральными атомами, ионами аргона что приводит к охлаждению электронов [26].

В ходе экспериментов было обнаружено что температура электронов в зависимости от давления при 0,4 торр имеет самую низкую температуру электронов. Как показано на рис. 2, температура электронов снижается с 1,01 эВ до 0,92 эВ при повышении давления до 0,4 торр при фиксированном напряжении 1 кВ. При

дальнейшем повышении давления от 0,4 до 1 торр температура электронов увеличивается и достигает 1,04 эВ. Возможно, причиной такой тенденций было утечка газа из системы.

Полученные результаты температуры электронов в чистом аргоне хорошо согласуется с другими исследованиями [43, 44] которые использовали для определения оптический метод.

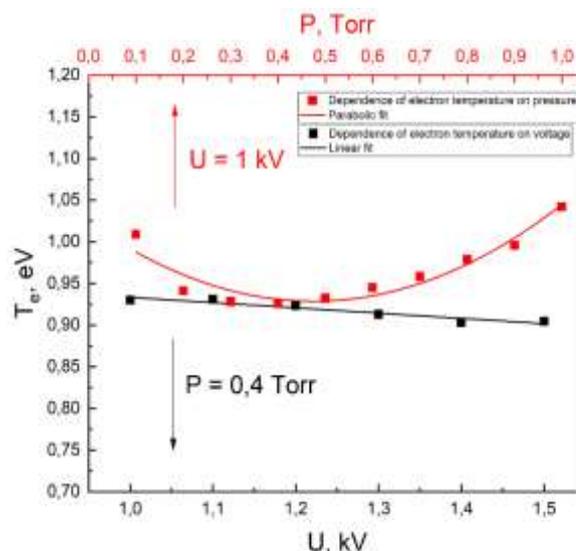


Рисунок 2 - Зависимость температуры электронов в аргоновой плазме от напряжения при давлении 0,4 торр (красная линия) и давления при напряжениях 1 кВ (черная линия)

Плазма Ar-C₂H₂

Пылевая плазма была получена путем введения химически активного газа (ацетилен), и было замечено, что размер и концентрация частиц в плазме не остаются постоянными в зависимости от времени. Аналогичные результаты были представлены в работах [45, 46]. Изменение размера и концентрации частиц резко влияет на основные параметры плазмы [31].

Результаты показали, что после введения ацетилена в плазму аргона температура электронов изменяется в зависимости от времени. На рис. 3 представлены графики зависимости температуры электронов от времени при различных значениях давления и напряжения плазмы. В начальный момент температура электронов выше и по истечению времени снижается. Повышение температуры электронов после введения ацетилена можно объяснить тем, что начинается процесс формирования пылевых частиц, который приводит к снижению концентрации электронов нарушая ионизационный баланс в плазме, тем самым отрицательно заряжая частицы. Повышения температуры электронов является механизмом

компенсации падения концентраций электронов для поддержания разряда [27, 47, 31]. Дальнейшее снижение температуры электронов с течением времени можно объяснить образованием пылевых частиц, прошедших несколько стадий роста [31]. Пылевые частицы под воздействием электростатических сил оседают на поверхности анода, что приводит к уменьшению их концентрации в наблюдаемой зоне и, как следствие, к снижению температуры электронов.

Температура электронов в зависимости от давления в пылевой плазме повторяет тенденцию аргоновой плазмы (рис.2). На рисунке 3 видно, что самая низкая температура электронов наблюдается при показателе давлений 0,4 торр. Предположительно в данном показателе давления процесс формирования частиц происходит быстрее. При более высоких показателях давления процесс протекает более медленно из-за присутствия высокой концентрации частиц.

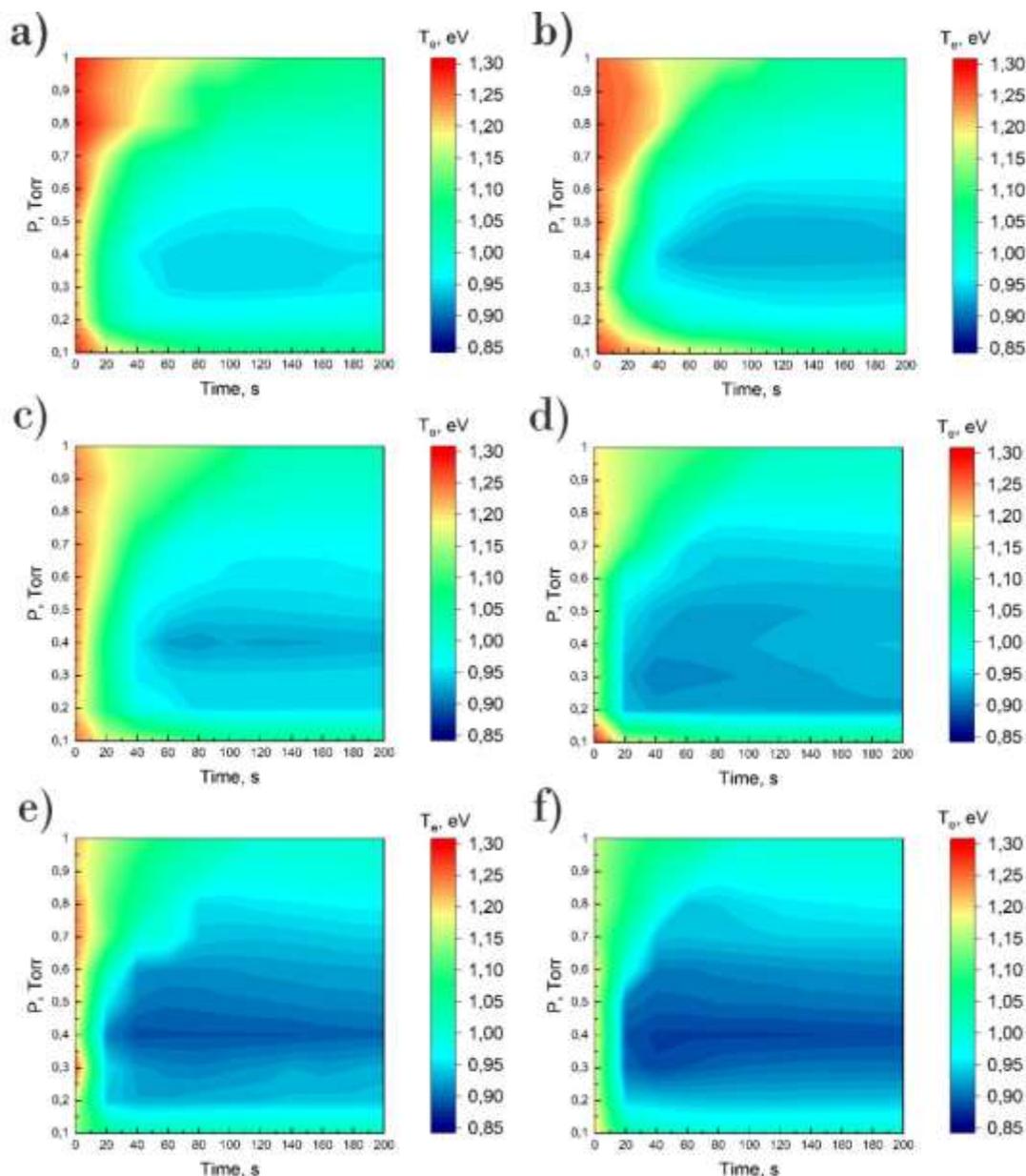


Рисунок 3 – Зависимость температуры электронов от времени и давления в плазме $\text{Ar-C}_2\text{H}_2$ при различных значениях напряжения: а) 1 кВ, б) 1,1 кВ, в) 1,2 кВ, г) 1,3 кВ, е) 1,4 кВ, ф) 1,5 кВ.

Результаты показали, что с повышением напряжения, подаваемого источником, температура электронов снижается. На рисунке 3А при напряжении 1 кВ и фиксированном

давлении 0,4 торр, в момент времени $t = 60$ с, температура электронов равна $\sim 0,95$ эВ. При дальнейшем повышении напряжения источника до 1,5 кВ температура электронов снижается

примерно до $\sim 0,9$ эВ, при фиксированном значении других параметров. Снижение температуры электронов можно объяснить тем, что процесс формирования частиц происходит быстрее тем самым за счет более сильной электрической силы действующее на пылевые частицы, покидают зону наблюдения. В работе [38] говорится, что при повышении мощности процесс диссоциаций молекул происходит быстрее тем самым ускоряется процесс формирования частиц.

Заключение

В данной работе изучалась температура электронов в аргоновой и аргонно-ацетиленовой плазме в зависимости от основных параметров плазмы. Результаты показали, что с увеличением напряжения источника аргоновой плазмы температура электронов линейно уменьшается. Напротив, температура электронов в зависимости от давления демонстрировала снижение вплоть до значения давления 0,4 торр, после чего она возрастала.

В пылевой плазме температура электронов в зависимости от времени в начальный момент

была высокой и по истечению времени температура электронов снижается. Такая тенденция связано с ростом пылевых частиц. При введениях ацетилена в газоразрядную трубку начинается рост пылевых частиц что приводит к снижению концентраций электронов тем самым для поддержания ионизационного процесса, а также самого разряда электроны нагреваются. Температура электронов в пылевой плазме зависимости от давления показало схожую тенденцию с аргоновой плазмы. Температура электронов при показателе давления 0,4 торр была самая низкая и также предположительно при таком показателе процесс формирования частиц происходит быстрее. Таким образом данное исследование позволило изучить температуру электронов в зависимости от разных параметров плазмы тем самым дав понимания влияния присутствия пылевых частиц.

Благодарность

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP19576153 и BR18574080).

Литература

- 1 Thoma M.H., Thomas H.M., Knapek C.A., Melzer A., Konopka U. Complex plasma research under microgravity conditions // *npj Microgravity*. – 2023. – Vol.9. – P.13.
- 2 Beckers J., Berndt J., Block D., Bonitz M., Bruggeman P.J., Couëdel L., Delzanno G.L., Feng Y., Gopalakrishnan, R., Greiner F., Hartmann P., Horányi M., Kersten H., Knapek C.A., Konopka U., Kortshagen U., Kostadinova, E.G., Kovačević, E., Krasheninnikov, S.I., Mann, I., Mariotti, D., Matthews, L.S., Melzer, A., Mikikian, M., Nosenko V., Pustynnik M.Y., Ratynskaia S., Sankaran R.M., Schneider V., Thimsen E.J., Thomas E., Thomas H.M., Tolia P., van de Kerkhof M. Physics and applications of dusty plasmas: The Perspectives 2023 // *Phys. Plasmas*. – 2023. – Vol.30. – Art.No.120601.
- 3 Pustynnik M.Y., Fink M.A., Nosenko V., Antonova T., Hagl T., Thomas H.M., Zobnin A.V., Lipaev A.M., Usachev A.D., Molotkov V.I., Petrov O.F., Fortov V.E., Rau C., Deysenroth C., Albrecht, S., Kretschmer M., Thoma M.H., Morfill G.E., Seurig R., Stettner A., Alyamovskaya V.A., Orr A., Kufner E., Lavrenko E.G., Padalka G.I., Serova E.O., Samokutyayev A.M., Christoforetti S. Plasmakristall-4: New complex (dusty) plasma laboratory on board the International Space Station. // *Review of Scientific Instruments*. *Rev. Sci. Instrum.* – 2016. – Vol.87. – Art.No.093505.
- 4 Fortov V., Morfill G., Petrov O., Thoma M., Usachev A., Hoefner H., Zobnin A., Kretschmer M., Ratynskaia S., Fink M., Tarantik K., Gerasimov Y., Esenkov V. The project “Plasmakristall-4” (PK-4) - A new stage in investigations of dusty plasmas under microgravity conditions: First results and future plans. // *Phys. Control. Fusion*. – 2005. – Vol.47. – P.B537.
- 5 Lipaev A.M., Molotkov V.I., Zhukhovitskii D.I., Naumkin V.N., Usachev A.D., Zobnin A. V., Petrov O.F., Fortov V.E. Study of the Dusty-Gas Discharge Plasma in the Plasma Crystal-3 Plus Space Laboratory (Review). // *High Temperature*. – 2020. – Vol.58. – P.449-475.
- 6 Thomas H.M., Morfill G.E., Fortov V.E., Ivlev A. V., Molotkov V.I., Lipaev A.M., Hagl T., Rothermel H., Khrapak S.A., Suetterlin R.K., Rubin-Zuzic M., Petrov O.F., Tokarev V.I., Krikalev S.K. Complex plasma laboratory PK-3 Plus on the International Space Station. // *New J Phys*. – 2008. – Vol.10. – Art.No. 033036.
- 7 Khrapak A.G., Molotkov V.I., Lipaev A.M., Zhukhovitskii D.I., Naumkin V.N., Fortov V.E., Petrov O.F., Thomas H.M., Khrapak S.A., Huber P., Ivlev A., Morfill G.: Complex Plasma Research under Microgravity Conditions: PK-3 Plus Laboratory on the International Space Station // *Contributions to Plasma Physics*. – 2016. – Vol.56. – P.253-262.
- 8 Thomas H.M., Morfill G.E., Ivlev A. V., Nefedov A.P., Fortov V.E., Rothermel H., Rubin-Zuzic M., Lipaev A.M., Molotkov V.I., Petrov O.F. PKE-nefedov - Complex plasma research on the international space station. // *Microgravity sci. Technol.* – 2005. – Vol.16. – P.317–321.

- 9 Piel A. Plasma crystals: Experiments and simulation. // *Plasma Phys. Control. Fusion.* – 2017. – Vol.59. – Art.No. 014001.
- 10 Mitic S., Pustynnik M.Y., Erdle D., Lipaev A.M., Usachev A.D., Zobnin A. V., Thoma M.H., Thomas H.M., Petrov O.F., Fortov V.E., Kononenko O. Long-term evolution of the three-dimensional structure of string-fluid complex plasmas in the PK-4 experiment. // *Phys Rev E.* – 2021. – Vol.103. – Art.No.063212.
- 11 Pustynnik M.Y., Klumov B., Rubin-Zuzic M., Lipaev A.M., Nosenko V., Erdle D., Usachev A.D., Zobnin A.V., Molotkov V.I., Joyce G., Thomas H.M., Thoma M.H., Petrov O.F., Fortov V.E., Kononenko O. Three-dimensional structure of a string-fluid complex plasma. // *Phys Rev Res.* – 2020. – Vol.2. – Art.No. 033314.
- 12 Liu B., Goree J., Pustynnik M.Y., Thomas H.M., Fortov V.E., Lipaev A.M., Usachev A.D., Petrov O.F., Zobnin A.V., Thoma M.H.: Time-dependent shear motion in a strongly coupled dusty plasma in PK-4 on the international space station (ISS). *IEEE Transactions on Plasma Science.* – 2021. – Vol.49. – P.2972-2978.
- 13 Chutia B., Deka T., Bailung Y., Sharma S.K., Bailung H. A nanodusty plasma experiment to create extended dust clouds using reactive argon acetylene plasmas. // *Phys Plasmas.* – 2021. – Vol.28. – Art.No. 063703.
- 14 Bajaj P., Khrapak S., Yaroshenko V., Schwabe M. Spatial distribution of dust density wave properties in fluid complex plasmas. // *Phys Rev E.* – 2022. – Vol.105. – Art.No.025202.
- 15 Jaiswal S., Pustynnik M.Y., Zhdanov S., Thomas H.M., Lipaev A.M., Usachev A.D., Molotkov V.I., Fortov V.E., Thoma M.H., Novitskii O.V. Dust density waves in a dc flowing complex plasma with discharge polarity reversal. // *Phys Plasmas.* – 2018. – Vol.25. – Art.No. 083705.
- 16 Yaroshenko V.V., Khrapak S.A., Pustynnik M.Y., Thomas H.M., Jaiswal S., Lipaev A.M., Usachev A.D., Petrov O.F., Fortov V.E.: Excitation of low-frequency dust density waves in flowing complex plasmas. // *Phys Plasmas.* – 2019. – Vol.26. – Art.No. 053702.
- 17 Wang Y., Zhu X., Chen Z., Huang F. Numerical study on the influence of electron temperature on void formation in dusty plasma. // *Phys Scr.* – 2020. – Vol.95. – Art.No. 055606.
- 18 Vasilyak L.M., Vetchinin S.P., Polyakov D.N. Effect of Ionization on Void Formation in an RF Discharge under Microgravity Conditions. // *Plasma Phys. Rep.* – 2023. – Vol.49. – P.290–295.
- 19 Pikalev A., Semenov I., Pustynnik M., R ath C., Thomas H. Dim and bright void regimes in capacitively-coupled RF complex plasmas. // *Plasma Sources Sci Technol.* – 2021. – Vol.30. – Art.No.035014.
- 20 Lipaev A.M., Khrapak S.A., Molotkov V.I., Morfill G.E., Fortov V.E., Ivlev A. V., Thomas H.M., Khrapak A.G., Naumkin V.N., Ivanov A.I., Tretschew S.E., Padalka G.I. Void closure in complex plasmas under microgravity conditions. // *Phys Rev Lett.* – 2007. – Vol.98. – Art.No.265006.
- 21 Liang Y., Yuan C., Li H., Tian R., Wu J., Kudryavtsev A.A., Zhou Z., Tian H. Influence of dust particles on DC glow discharge plasma. // *Phys Plasmas.* – 2018. – Vol.25. – Art.No. 023701.
- 22 Chami A., Arnas C. Spatial distributions of plasma parameters in conventional magnetron discharges in presence of nanoparticles. // *J Plasma Phys.* – 2020. – Vol.86. – Art.No. 905860512.
- 23 Schmidt, J., Hyde T.W. Discharge parameters of PlasmaKristall-4BU: A modifiable dusty plasma experiment // *Rev. Sci. Instrum.* – 2021. – Vol.91. – Art.No. 083506.
- 24 Ding, Z., Yao J., Wang Y., Yuan C., Zhou Z., Kudryavtsev A.A., Gao R., Jia J. Machine learning combined with Langmuir probe measurements for diagnosis of dusty plasma of a positive column. // *Plasma Sci. Technol.* – 2021. – Vol.23. – Art.No. 095403.
- 25 Antonova T., Khrapak S.A., Pustynnik M.Y., Rubin-Zuzic M., Thomas H.M., Lipaev A.M., Usachev A.D., Molotkov V.I., Thoma M.H. Particle charge in PK-4 dc discharge from ground-based and microgravity experiments. // *Phys. Plasmas.* – 2019. – Vol.26. – Art.No. 113703.
- 26 Orazbayev S.A., Ussenov Y.A., Ramazanov T.S., Dosbolayev M.K., Utegenov A.U. A Calculation of the Electron Temperature of Complex Plasma of Noble Gases Mixture in CCRF Discharge. // *Contributions to Plasma Physics.* – 2015. – Vol.55. – P.428-433.
- 27 Ussenov Y.A., von Wahl E., Marvi Z., Ramazanov T.S., Kersten H. Langmuir probe measurements in nanodust containing argon-acetylene plasmas. // *Vacuum.* – 2019. – Vol.166. – P.15-25.
- 28 Klindworth M., Arp O., Piel A. Langmuir probe system for dusty plasmas under microgravity. // *Rev. Sci. Instrum.* – 2007. – Vol.78. – Art.No. 033502.
- 29 Ussenov Y.A., Ramazanov T.S., Dzhumagulova K.N., Dosbolayev M.K. Application of dust grains and Langmuir probe for plasma diagnostics // *EPL.* – 2014. – Vol.105. – Art.No. 15002.
- 30 Staps T.J.A., Donders T.J.M., Platier B., Beckers J. In-situ measurement of dust charge density in nanodusty plasma. // *J Phys D Appl Phys.* – 2022. – Vol.55. – Art.No. 08LT01.
- 31 Donders T.J.M., Staps T.J.A., Beckers J. Characterization of cyclic dust growth in a low-pressure, radio-frequency driven argon-hexamethyldisiloxane plasma // *J Phys D Appl Phys.* – 2022. – Vol.55. – Art.No. 395203.
- 32 Killer C., Wegner T., Melzer A., Meichsner J. Influence of dust particles on the bulk electron density in radio frequency plasmas measured by microwave interferometry. // *Phys Plasmas.* – 2015. – Vol.22. – Art.No. 123702.
- 33 Stefanović I., Sadeghi N., Winter J., Sikimić B. Influence of nanoparticle formation on the time and the space resolved metastable density in argon-acetylene plasmas // *Plasma Sources Sci Technol.* – 2017. – Vol.26. – Art.No.065014.
- 34 Garofano V., B erard R., Boivin S., Joblin C., Makasheva K., Stafford L. Multi-scale investigation in the frequency domain of Ar/HMDSO dusty plasma with pulsed injection of HMDSO // *Plasma Sources Sci Technol.* – 2019. – Vol.28. – Art.No.055019.

- 35 Garofano V., Stafford L., Despax B., Clergereaux R., Makasheva K. Cyclic evolution of the electron temperature and density in dusty low-pressure radio frequency plasmas with pulsed injection of hexamethyldisiloxane // *Appl. Phys. Lett.* – 2015. – Vol.107. – Art.No. 183104.
- 36 Niu T.Y., Cao J.X., Liu L., Liu J.Y., Wang Y., Wang L., Lv Y. A comparison among optical emission spectroscopic methods of determining electron temperature in low pressure argon plasmas // *Chinese Physics.* – 2007. – Vol.16. – P.2757-2763.
- 37 Gordillo-Vázquez F.J., Camero M., Gómez-Aleixandre C. Spectroscopic measurements of the electron temperature in low pressure radiofrequency Ar/H₂/C₂H₂ and Ar/H₂/CH₄ plasmas used for the synthesis of nanocarbon structures // *Plasma Sources Sci Technol.* – 2006. – Vol.15. – P.42-51.
- 38 Hundt M., Sadler P., Levchenko I., Wolter M., Kersten H., Ostrikov K. Real-time monitoring of nucleation-growth cycle of carbon nanoparticles in acetylene plasmas. // *J Appl Phys.* – 2011. – Vol.109. – Art.No.123305.
- 39 Kil B.C., Seon C.R., Chung C.W., Yoon N.S., Wonho C. Correlation between nanoparticle and plasma parameters with particle growth in dusty plasmas. // *J Appl Phys.* – 2011. – Vol.109. – Art.No.013312.
- 40 Bouchoule A., Boufendi L., Hermann J., Plain A., Hbid T., Kroesen G., Stoffels E., Stoffels W.W. Formation of dense submicronic clouds in low pressure Ar-SiH₄ RF reactor: Diagnostics and growth processes from monomers to large size particulates // *Pure and Appl. Chem.* – 1996. – Vol.68. – P.1121-1126.
- 41 Xiong Z., Held J., Kortshagen U. Reliability of double probe measurements in nanodusty plasmas // *Plasma Sources Sci Technol.* – 2023. – Vol.32. – Art.No. 035001.
- 42 Fujimoto T. Kinetics of Ionization-Recombination of a Plasma and Population Density of Excited Ions. II. Ionizing Plasma. // *J. Phys. Soc. Jpn.* – 1979. – Vol.47. – P.273-281.
- 43 Tangjitsomboon P., Ngamrunroj D., Mongkolnavin R. Comparison of electron temperature in DC glow discharge and AC glow discharge plasma. // In: *Journal of Physics: Conference Series.* – 2019. – Vol.1380. – Art.No. 012022.
- 44 Mitic S., Pustyl'nik M.Y., Morfill G.E. Spectroscopic evaluation of the effect of the microparticles on radiofrequency argon plasma. // *New J Phys.* – 2009. – Vol.11. – Art.No. 083020.
- 45 Groth S., Greiner F., Piel A. Spatio-temporally resolved investigations of layered particle growth in a reactive argon-acetylene plasma // *Plasma Sources Sci Technol.* – 2019. – Vol.28. – Art.No. 115016.
- 46 Donders T., Staps T., Beckers J. Time-Synchronized Microwave Cavity Resonance Spectroscopy and Laser Light Extinction Measurements as a Diagnostic for Dust Particle Size and Dust Density in a Low-Pressure Radio-Frequency Driven Nanodusty Plasma. // *Appl. Sci.* – 2022. – Vol.12. – Art.No. 12013.
- 47 Denysenko I., Berndt J., Kovacevic E., Stefanovic I., Selenin V., Winter J. The response of a capacitively coupled discharge to the formation of dust particles: Experiments and modeling. // *Phys Plasmas.* – 2006. – Vol.13.

References

- 1 M.H. Thoma, H.M. Thomas, C.A. Knapek, A. Melzer, and U. Konopka, *npj Microgravity* 9, 13 (2023).
- 2 J. Beckers, J. Berndt, D. Block, M. Bonitz, P. J. Bruggeman, L. Couëdel, G.L. Delzanno, and et al, *Phys. Plasmas* 30, 120601 (2023).
- 3 M. Y. Pustyl'nik, M.A. Fink, V. Nosenko, T. Antonova, and et. al, *Rev. Sci. Instrum.* 87, 093505 (2016).
- 4 V. Fortov, G. Morfill, O. Petrov, M. Thoma, and et. al, *Phys. Control. Fusion* 47, B537 (2005).
- 5 A.M. Lipaev, V.I. Molotkov, D.I. Zhukhovitskii, V.N. Naumkin, and et. al, *High Temp.* 58, 449 (2020).
- 6 H.M. Thomas, G.E. Morfill, V.E. Fortov, A.V. Ivlev, and et. al, *New J. Phys.* 10, 033036 (2008).
- 7 A.G. Khrapak, V.I. Molotkov, A.M. Lipaev, D.I. Zhukhovitskii, V.N. Naumkin, V.E. Fortov, O.F. Petrov, H. M. Thomas, S. A. Khrapak, P. Huber, A. Ivlev, and G. Morfill, *Contrib. Plasma Phys.* 56, 253 (2016).
- 8 H.M. Thomas, G.E. Morfill, A.V. Ivlev, A.P. Nefedov, V E. Fortov, H. Rothermel, and et.al, *Microgravity Sci. Technol.* 16, 317 (2005).
- 9 Piel, *Plasma Phys. Control. Fusion* 59, 014001 (2017).
- 10 S. Mitic, M.Y. Pustyl'nik, D. Erdle, A.M. Lipaev, and et. al, *Phys. Rev. E* 103, 063212 (2021).
- 11 M.Y. Pustyl'nik, B. Klumov, M. Rubin-Zuzic, A.M. Lipaev, and et. al, *Phys. Rev. Res.* 2, 033314 (2020).
- 12 B. Liu, J. Goree, M.Y. Pustyl'nik, H.M. Thomas, V.E. Fortov, and et. al, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 49, 2972 (2021).
- 13 B. Chutia, T. Deka, Y. Bailung, S. K. Sharma, and H. Bailung, *Phys. Plasmas* 28, 063703 (2021).
- 14 P. Bajaj, S. Khrapak, V. Yaroshenko, and M. Schwabe, *Phys. Rev. E* 105, 025202 (2022).
- 15 S. Jaiswal, M. Y. Pustyl'nik, S. Zhdanov, H. M. Thomas, and et. al, *Phys. Plasmas* 25, 083705 (2018).
- 16 V.V. Yaroshenko, S.A. Khrapak, M.Y. Pustyl'nik, H.M. Thomas, and et. al, *Phys. Plasmas* 26, 053702 (2019).
- 17 Y. Wang, X. Zhu, Z. Chen, and F. Huang, *Phys. Scr.* 95, 055606 (2020).
- 18 L. M. Vasilyak, S. P. Vetchinin, and D. N. Polyakov, *Plasma Phys. Rep.* 49, 290 (2023).
- 19 Pikalev, I. Semenov, M. Pustyl'nik, C. R ath, and H. Thomas, *Plasma Sources Sci. Technol.* 30, 035014 (2021).
- 20 M. Lipaev, S. A. Khrapak, V. I. Molotkov, G. E. Morfill, V. E. Fortov, A. V. Ivlev, H. M. Thomas, A. G. Khrapak, V. N. Naumkin, A. I. Ivanov, S. E. Tretschnev, and G. I. Padalka, *Phys. Rev. Lett.* 98, 265006 (2007).
- 21 Y. Liang, C. Yuan, H. Li, R. Tian, J. Wu, A. A. Kudryavtsev, and Z. Zhou, *Phys. Plasmas* 25, 023701 (2018).

- 22 Chami and C. Arnas, *J. Plasma Phys.* 86, 905860512 (2020).
- 23 J. Schmidt and T. W. Hyde, *Rev. Sci. Instrum.* 91, 083506 (2020).
- 24 Z. Ding, J. Yao, Y. Wang, C. Yuan, Z. Zhou, A. A. Kudryavtsev, R. Gao, and J. Jia, *Plasma Sci. Technol.* 23, 095403 (2021).
- 25 T. Antonova, S.A. Khrapak, M.Y. Pustynnik, M. Rubin-Zuzic, H.M. Thomas, A.M. Lipaev, A.D. Usachev, V.I. Molotkov, and M.H. Thoma, *Phys. Plasmas* 26, 113703 (2019).
- 26 S. A. Orazbayev, Y. A. Ussenov, T. S. Ramazanov, M. K. Dosbolayev, and A. U. Utegenov, *Contrib. Plasma Phys.* 55, 428-433 (2015).
- 27 Y.A. Ussenov, E. von Wahl, Z. Marvi, T.S. Ramazanov, and H. Kersten, *Vacuum* 166, 15-25 (2019).
- 28 M. Klindworth, O. Arp, and A. Piel, *Rev. Sci. Instrum.* 78, 033502 (2007).
- 29 Y.A. Ussenov, T.S. Ramazanov, K.N. Dzhumagulova, and M.K. Dosbolayev, *EPL* 105, 15002 (2014).
- 30 T.J.A. Staps, T.J.M. Donders, B. Platier, and J. Beckers, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 55, 08LT01 (2022).
- 31 T.J.M. Donders, T.J.A. Staps, and J. Beckers, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 55, 395203 (2022).
- 32 C. Killer, T. Wegner, A. Melzer, and J. Meichsner, *Phys. Plasmas* 22, 123702 (2015).
- 33 I. Stefanović, N. Sadeghi, J. Winter, and B. Sikimić, *Plasma Sources Sci. Technol.* 26, 065014 (2017).
- 34 V. Garofano, R. Bérard, S. Boivin, C. Joblin, K. Makasheva, and L. Stafford, *Plasma Sources Sci. Technol.* 28, 055019 (2019).
- 35 V. Garofano, L. Stafford, B. Despax, R. Clergereaux, and K. Makasheva, *Appl. Phys. Lett.* 107, 183104 (2015).
- 36 T.Y. Niu, J.X. Cao, L. Liu, J.Y. Liu, Y. Wang, L. Wang, and Y. Lv, *Chin. Phys.* 16, 2757-2763 (2007).
- 37 F.J. Gordillo-Vázquez, M. Camero, and C. Gómez-Aleixandre, *Plasma Sources Sci. Technol.* 15, 42-51 (2006).
- 38 M. Hundt, P. Sadler, I. Levchenko, M. Wolter, H. Kersten, and K. Ostrikov, *J. Appl. Phys.* 109, 123305 (2011).
- 39 B.C. Kil, C.R. Seon, C.W. Chung, N.S. Yoon, and C. Wonho, *J. Appl. Phys.* 109, 013312 (2011).
- 40 A. Bouchoule, L. Boufendi, J. Hermann, A. Plain, T. Hbid, G. Kroesen, E. Stoffels, and W. W. Stoffels, *Pure Appl. Chem.* 68, 1121-1126 (1996).
- 41 Z. Xiong, J. Held, and U. Kortshagen, *Plasma Sources Sci. Technol.* 32, 035001 (2023).
- 42 T. Fujimoto, *J. Phys. Soc. Jpn.* 47, 273-281 (1979).
- 43 P. Tangjitsomboon, D. Ngamrungraj, and R. Mongkolnavin, *J. Phys.: Conf. Ser.* 1380, 012022 (2019).
- 44 S. Mitic, M. Y. Pustynnik, and G. E. Morfill, *New J. Phys.* 11, 083020 (2009).
- 45 S. Groth, F. Greiner, and A. Piel, *Plasma Sources Sci. Technol.* 28, 115016 (2019).
- 46 T. Donders, T. Staps, and J. Beckers, *Appl. Sci.* 12, 12013 (2022).
- 47 I. Denysenko, J. Berndt, E. Kovacevic, I. Stefanovic, V. Selenin, and J. Winter, *Phys. Plasmas* 13, (2006).

История статьи:

Поступила 26 июля 2024

Поступила после доработки 05 сентября 2024

Принята 08 сентября 2024

Article history:

Received 26 July 2024

Received in revised form 5 September 2024

Accepted 8 September 2024

Сведения об авторах:

1. **Ж.Е. Онайбергенов** – студент бакалавриата, Институт прикладных наук и информационных технологий, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан, email: onajbergenovz@gmail.com

2. **А.Е. Абдрахманов** – PhD студент, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан. email: azamat.abdrakhman06@gmail.com

3. **С.А. Оразбаев** – PhD, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан. email: sagi.orazbayev@gmail.com

4. **Т.С. Рамазанов** – докт.физ.-мат.наук, Академик НАН РК при Президенте РК, проф., Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан. email: ramazan@physics.kz

5. **А.У. Утегенов** (автор-корреспондент) - PhD, Институт прикладных наук и информационных технологий, Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан. email: almasbek@physics.kz

Information about authors:

1. **Z.E. Onaibergenov** – undergraduate student, Institute of Applied Sciences and Information Technologies, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan. email: onajbergenovz@gmail.com

2. **A.E. Abdrakhmanov** – PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan. email: azamat.abdrakhman06@gmail.com

3. **S.A. Orazbayev** – PhD, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan. email: sagi.orazbayev@gmail.com

4. **T.S. Ramazanov** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Academician of the NAS under the President of the Republic of Kazakhstan, Prof., Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan email: : ramazan@physics.kz

5. **A.U. Utegenov** (corresponding author) – PhD, Institute of Applied Sciences and Information Technologies, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan. email: almasbek@physics.kz