

Регистрация собственного вращения пылевых частиц в условиях ВЧ разряда индукционного типа

© В.Ю. Карасев, Е.С. Дзалиева, С.И. Павлов, Л.А. Новиков, И.Ч. Машек

Санкт-Петербургский государственный университет,
199034 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: plasmadust@yandex.ru, v.karasev@spbu.ru

(Поступило в Редакцию 13 февраля 2018 г.)

Исследована динамика собственного вращения (вокруг центра масс) пылевых частиц в магнитном поле. Впервые проведены измерения угловой скорости собственного вращения в пылевой ловушке в разряде ВЧ типа. Измеренная угловая скорость вращения не обнаруживает зависимости от магнитной индукции до значений 700 Г, ожидающейся от действия ионного увлечения. Также впервые измерена скорость собственного вращения в зависимости от давления газа разряда во время нахождения частиц в пылевой ловушке и от вкладываемой в разряд мощности. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с развиваемой моделью появления собственного вращения пылевой частицы в процессе поддержания ее стационарного заряда.

DOI: 10.21883/JTF.2019.01.46961.71-18

Введение

Пылевая плазма [1–3] сегодня является не только отдельным типом плазмы, но и системой, в которой реализуются и изучаются необычные для вещества физические свойства [4–10]. В отличие от механических, термодинамических и электрических свойств, которые в пылевой плазме за последние 20 лет изучались в различной степени, магнитные свойства остаются не изученными практически полностью. Касательно экспериментальных работ в этом контексте, можно говорить только о [11,12] и серии продолжающихся исследований [13–16]. Здесь мы не затрагиваем проблему динамики поведения плазменно-пылевых структур во внешнем магнитном поле, которая для слабых магнитных была решена в предыдущие 10 лет [17–25], а для сильных магнитных полей решается в настоящее время [26–30].

Для изучения магнитных свойств пылевой плазмы, создаваемой из частиц немагнитных материалов, нужно рассматривать систему быстро вращающихся сильно заряженных волчков размера в десятки микрон. Вращаясь с частотой порядка 10^3 Hz и неся на поверхности заряд до $10^6 e$, волчки обладают магнитным моментом величиной до $10^5 \mu_B$.

Находясь в плазме, пылевые частицы приобретают собственное вращение вокруг центра инерции. Принципиальными вопросами для данной задачи являются следующие: выяснение причины и механизма раскручивания волчка, зависимость угловой скорости от магнитного поля, ориентации магнитных моментов (угловых скоростей) системы волчков.

В ряде теоретических работ, например [31–35], причиной вращения предполагается действие направленного потока плазмы (тока разряда, потока из-за неоднородности условий и геометрии) в магнитном поле или без него. В исследовании [16] мы пытались найти влияние

такого потока на угловую скорость частиц (влияние кластера соседних частиц, роль асимметричного положения в пылевой ловушке). Но убедительным ответом на данный вопрос было бы экспериментальное исследование собственного вращения частиц в ВЧ разряде, где отсутствует прямой ток. Литературные данные показывают, что ранее экспериментальные исследования собственного вращения проводились только в условиях разряда постоянного тока.

В настоящей работе ставится задача провести поисковое исследование собственного вращения пылевых частиц в условиях ВЧ разряда. Необходимо подобрать условия для реализации эксперимента, определить, существует ли вращение в отсутствие магнитного поля, и получить зависимость скорости вращения от магнитной индукции при максимально возможном ее значении.

Эксперимент и результаты

Для создания магнитного поля с индукцией до 1Т использовался электромагнит, создающий между полюсами диаметром 30 см, разнесенными на дистанцию 5 см, горизонтально направленное магнитное поле с высокой степенью однородности 0.01% во всем внутреннем объеме. Для эксперимента в качестве разрядной камеры была выбрана разрядная трубка диаметром 2 и длиной 50 см и ВЧ разряд индукционного типа. Трубка с малым перпендикулярным отростком, в котором располагался контейнер с пылевыми частицами, не была снабжена электродами и зондами, имела плоское торцевое окно для наблюдения с высоким оптическим увеличением без значительных аберраций. На боковую поверхность трубки была намотана антенна ВЧ генератора, состоящая из трех витков медного провода (рис. 1). В части экспериментов трубка ориентировалась внутри магнитных полюсов горизонтально, в части вертикально.

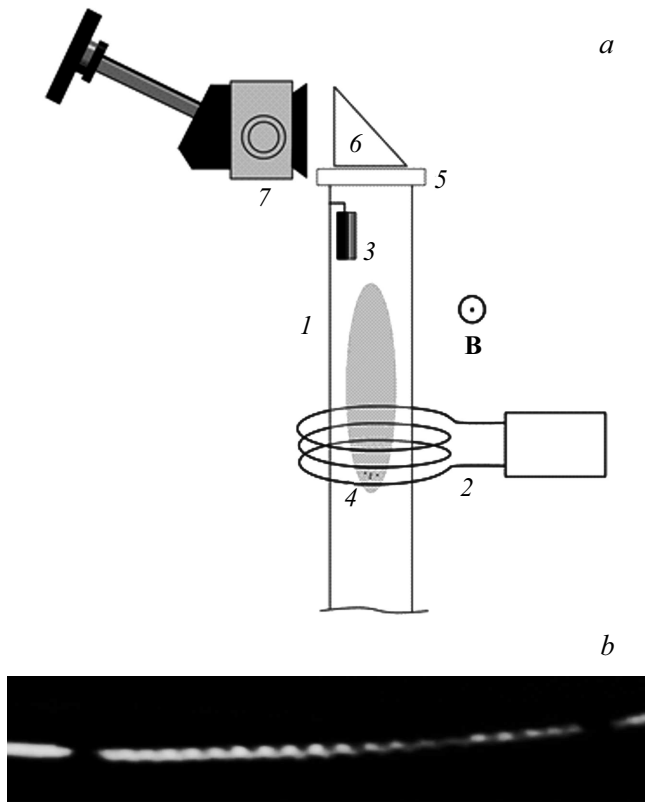


Рис. 1. *a* — схема экспериментальной установки по наблюдению собственного вращательного движения частиц в ВЧ разряде индукционного типа. 1 — стеклянная трубка, 2 — ВЧ генератор, 3 — контейнер с пылевыми частицами, 4 — пылевая ловушка, 5 — торцевое окно, 6 — поворотная призма, 7 — оптический микроскоп с системой видеорегистрации. **В** — пример развертки пылевой частицы. Условия: азот, $p = 0.05 \text{ mm Hg}$, $U_p = 300 \text{ V}$, $a = 7 \mu\text{m}$, кадр развертки демонстрирует 21 модуляцию, что соответствует частоте собственного вращения 630 Hz.

Вкладываемая в разряд мощность оценена как 60% от мощности, подаваемой на генератор и определяемой током источника и значением напряжения U_p , частота генератора 100 MHz. Трубка через систему вакуумных кранов и натекателя соединялась с вакуумной системой и термомпарным измерителем давления. В работе использовался азот, при горении разряда давление газа поддерживалось постоянным, либо задавалась скорость его изменения.

Для создания пылевой компоненты применялись частицы борсиликатного стекла размером от 10 до $120 \mu\text{m}$ с плотностью $0.4\text{--}0.9 \text{ g/cm}^3$ пустотелые внутри. На рис. 1 показана одна из реализаций геометрии эксперимента, который проводился следующим образом. При выбранном давлении зажигался ВЧ разряд, имеющий форму плазмоида длиной от 5 до 10 см в зависимости от мощности и давления газа. Далее вбрасывались частицы путем встряхивания контейнера, имеющего сетчатое дно, они подсвечивались излучением лазера мощностью

20 mW так, что расширенный пучок высвечивал всю область падения или левитации частиц в ловушке. Частицы левитировали вблизи нижнего края плазмоида в области сильного электрического поля. С помощью оптической системы, выполненной на базе длиннофокусного немагнитного микроскопа, производилось наблюдение образов частиц и запись на видеокамеру. В созданных условиях: газ азот, давление $0.01\text{--}0.1 \text{ mm Hg}$ левитация частиц оказалась возможной в магнитном поле до 400 G при горизонтально ориентированной разрядной трубке, и до 700 G в вертикально ориентированной трубке. Последнее связано с изменением направления действия силы термофореза в балансе сил.

В представляемых первых экспериментах условия существования пылевой плазмы подбирались эмпирически. В используемой разрядной трубке количественная диагностика не производилась. Для количественных оценок параметры плазмы брались из литературных данных [36–39], а также оценивались по балансу сил для левитирующих частиц наблюдаемого размера. Температура электронов была принята $T_e = 5 \text{ eV}$, заряд частиц радиуса $5 \mu\text{m}$ $q = 4 \cdot 10^4 e$, масса частицы $m_d = 5 \cdot 10^{-13} \text{ kg}$, напряженность электрического поля в области левитации оценена, как $E = 6 \text{ V/cm}$.

Наблюдения образов частиц в микроскоп во время их левитации в плазме показали, что в условиях эксперимента левитируют микросферы диаметром $10 \mu\text{m}$, а также осколки микросфер большего размера. В отсутствие магнитного поля они имеют угловую скорость собственного вращения от 500 до 10000 rad/s. Измерение угловой скорости производилось по методу координатной развертки, детально описанному ранее [13,14,16]. При увеличении магнитного поля в области 100 G плазмоид (и пылевая ловушка) проходят область неустойчивости. При выпадении частиц производился их новый доброс, и измерения продолжались от значения магнитной индукции 200 G. Зависимость угловой скорости собственного вращения от магнитного поля для нескольких частиц показана на рис. 2. На рис. 3 приведен фрагмент зависимости угловой скорости одной из частиц при изменении давления газа разряда. Уменьшение давления производилось достаточно медленно так, что частица не выпадала, и все время находилась в пылевой ловушке в области наблюдения с высоким оптическим увеличением. На рис. 4 приведен пример зависимости угловой скорости собственного вращения от напряжения источника (вкладываемой мощности).

Качественная интерпретация

Среди полученных результатов отсутствие зависимости угловой скорости собственного вращения от магнитной индукции является неожиданным. Элементарные оценки импульса, получаемого пылевой частицей от ионного потока, как принято в пылевой плазме, уравновешенного импульсом, передаваемым нейтральному

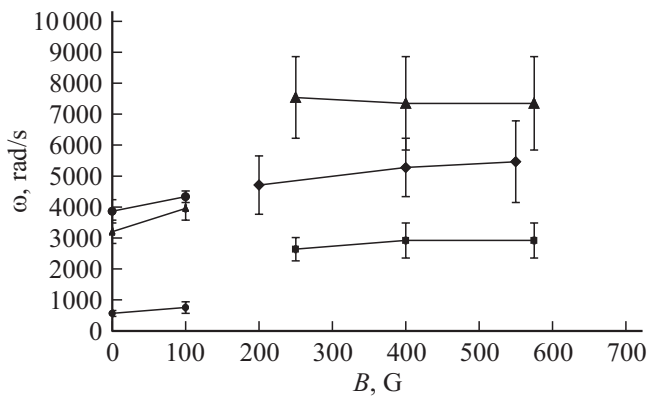


Рис. 2. Зависимость угловой скорости собственного вращения пылевых частиц от величины магнитного поля в пылевой ловушке в ВЧ разряде. Условия: азот, $p = 0.05\text{--}0.08$ mm Hg, частицы — полые стеклянные микросферы диаметром $10\ \mu\text{m}$. Частота ВЧ генератора 100 MHz, подаваемое напряжение 350 V. В области 150 G плазмодид меняет конфигурацию, после 200 G измерения продолжаются с новыми частицами.

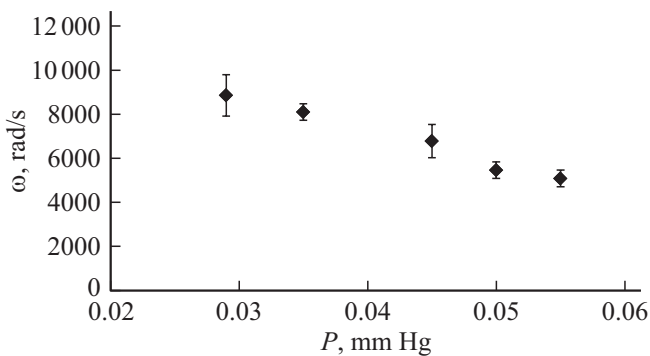


Рис. 3. Зависимость угловой скорости собственного вращения пылевых частиц от давления в ВЧ разряде. Условия: азот, $a = 7\ \mu\text{m}$. Частота ВЧ генератора 100 MHz, подаваемое напряжение 300 V.

газу из-за трения при вращении, дают угловую скорость порядка 10^5 rad/s. Теоретические модели, развиваемые в [34,35], предсказывают еще больший порядок скорости 10^6 rad/s. Зависимости скорости вращения от давления и мощности разряда оказались ожидаемыми. Обсудим полученные результаты по порядку.

Проведем количественную интерпретацию угловой скорости собственного вращения пылевой частицы в магнитном поле. В условиях эксперимента при $p \leq 0.1$ mm Hg дебаевский радиус экранирования значительно меньше длины пробега плазменных частиц. В процессе поддержания стационарного заряда на поверхность пылевой частицы непрерывно идут ионы и электроны с длины дебаевского масштаба в бесстолкновительном режиме. Рассмотрим сферическую частицу радиусом $a = 5\ \mu\text{m}$, она находится под плавающим потенциалом $U_{\text{п}}$ и имеет отрицательный заряд $q = aU_{\text{п}}$. Достигающие ее поверхности ионы ускоряются полем

частицы и получают скорость значительно больше тепловой, порядка 10^4 m/s. Только самые быстрые электроны способны преодолеть потенциальный барьер и достигнуть поверхности частицы.

В стационарном случае потоки электронов и ионов на поверхность частицы должны быть равными $n_e v_e = n_i v_i$. Стационарность поверхностного заряда частицы (мы не рассматриваем флуктуации заряда из-за дискретности процесса зарядки [5,7,8]) требует, чтобы средние скорости движения электронов и ионов к частице были равными $\langle v_e \rangle = \langle v_i \rangle$. Это означает, что при своем движении ионы и электроны в перпендикулярном магнитном поле будут приобретать одинаковый азимутальный импульс. Поскольку сила $F_L = ev_r B$ не зависит от массы частицы, а электроны и ионы проходят в процессе поддержания стационарного заряда равные расстояния за равные времена, то азимутальная составляющая импульса у них у поверхности частицы будет одинаковой. Рекомбинация на поверхности — неупругий процесс, можно предположить, что приобретенная азимутальная составляющая импульса полностью передается частице. В итоге, процесс поддержания стационарного заряда пылевой частицы в магнитном поле не приведет к раскручиванию частицы вокруг ее центра инерции.

Представленное качественное рассмотрение может объяснить отсутствие зависимости угловой скорости вращения от магнитного поля (см. рис. 2), а также аналогичное отсутствие зависимости, полученное ранее в тлеющем разряде [14,15]. Заметим, что рассмотрение потоков плазменных частиц без учета влияния магнитного поля в данном его диапазоне справедливо, так как электронные коэффициенты диффузии и подвижности остаются большими, чем ионные. Поскольку ионы не замагничены $\omega_i \tau_i < 1$ (ω_i — циклотронная частота, τ_i — время между столкновениями ионов), то для них коэффициент диффузии в магнитном поле не изменяется. Для электронов $\omega_e \tau_e > 1$, но еще выполняется условие $D_i \ll D_e / (1 + \omega_e^2 \tau_e^2)$, где D_i и D_e — коэффициенты диффузии ионов и электронов в отсутствие магнитного поля. Изменение потока электронов можно ожидать только в магнитном поле около 1 T, когда циклотронный радиус электрона будет сравним с размером самой пылевой частицы (или зонда) [40,41].

Пример зависимости угловой скорости собственного вращения от давления является уникальной возможностью проверить данную зависимость непосредственно (на одной частице). Согласно развиваемому представлению [13–16], угловая скорость слабо асимметричных частиц с формой, близкой к сферической, может быть представлена в виде

$$\omega = \frac{9\eta n_i q_d k T_n}{2\pi \epsilon_0 p m_n V_{Tn} a^2},$$

где V_{Tn} — тепловая скорость газа, p — давление газа, n_i — концентрация ионов, ϵ_0 — электрическая постоянная, k — постоянная Больцмана, η — степень

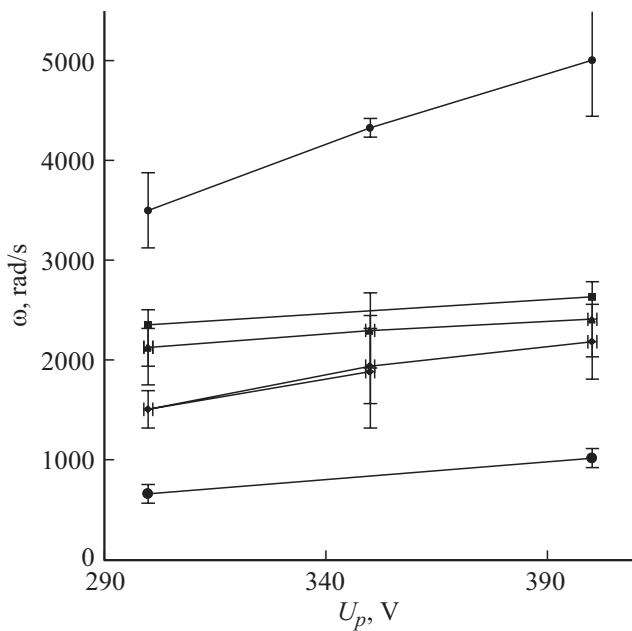


Рис. 4. Зависимость угловой скорости уединенных пылевых частиц от величины U_p . Условия: азот, $p = 0.05\text{--}0.11$ мм рт.ст., частицы — полые стеклянные микросферы радиусом $5\text{--}7$ мкм.

асимметрии частицы. Сопоставление с зависимостью на рис. 3 дает хорошее согласие.

Увеличение напряжения U_p , дающее увеличение мощности (и соответственное увеличение плотности плазмы n_i), вызывает увеличение угловой скорости, показанное на рис. 4, что также согласуется с приведенной формулой. Количественные соответствия эксперимента с численной оценкой получаются, если предполагать величину неидеальности геометрии частицы η до 20%, как это выполнялось для условий тлеющего разряда [13]. Таким образом, полученные в ВЧ разряде зависимости качественно согласуются с моделью раскручивания пылевого волчка, получающего азимутальный импульс от плазменных частиц в процессе поддержания стационарного заряда.

Заключение

В настоящей работе впервые проведены измерения угловой скорости собственного вращения пылевых частиц в пылевой ловушке в ВЧ разряде. Впервые измерена угловая скорость вращения от магнитной индукции вплоть до значений 700 Г, которая не обнаруживает изменения, ожидаемого от действия ионного увлечения. Измерены зависимости скорости вращения от давления газа разряда во время нахождения частицы в пылевой ловушке и от вкладываемой мощности. Зависимости хорошо согласуются с развиваемой моделью появления собственного вращения частицы в процессе поддержания ее стационарного заряда.

Эксперимент частично выполнен при поддержке РФФИ 14-02-00313, интерпретация проведена в рамках проекта РФФИ 18-02-00113.

Список литературы

- [1] *Chu J., Lin I.* // Phys. Rev. Lett. 1994. P. 724009.
- [2] *Thomas H., Morfill G., Demmel V., Goree J., Feuerbacher B., Mohlmann D.* // Phys. Rev. Lett. 1994. Vol. 73. P. 652.
- [3] *Hayashi Y., Tachibana K.* // Jpn. J. Appl. Phys. 1994. P. 33L804.
- [4] *Bouchoule A.* Dusty Plasmas: Physics, Chemistry, and Technological Impact in Plasma Processing. NY: John Wiley & Sons, 1999. 408 p.
- [5] *Fortov V.E., Morfill G.E.* Complex and dusty plasmas: from laboratory to space. NY: Taylor & Francis Group, 2010. 440 p.
- [6] *Shukla P.K., Mamun A.A.* Introduction to Dusty Plasma Physics. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2002. 395 p.
- [7] *Vladimirov S.V., Ostrikov K., Samarian A.A.* Physics and Applications of Complex Plasmas. London: Imperial College Press, 2005. 439 p.
- [8] *Tsytoich V.N., Morfill G.E., Vladimirov S.V., Thomas H.M.* Elementary Physics of complex plasmas. NY: Springer, 2008. 370 p.
- [9] *Karasev B.Yu., Dzlieva E.S., Pavlov S.I.* Лабораторная пылевая плазма в магнитном поле. СПб.: Свое Издательство, 2016. 136 с.
- [10] *Ваулина О.С., Петров О.Ф., Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А.* Пылевая плазма эксперимент и теория. М.: Физматлит, 2009. 315 с.
- [11] *Sato N.* // AIP Conf. Proc. 2005. Vol. 799. P. 97.
- [12] *Samsonov D., Zhdanov S., Morfill G.* // New Journ. Phys. 2003. Vol. 5. P. 24.
- [13] *Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Eikhval'd A.I.* et al. // Phys. Rev. E. 2009. Vol. 79. P. 026406.
- [14] *Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Ermolenko M.A., Golubev M.S., Ivanov A.Yu.* // Contr. Plasma Phys. 2011. Vol. 51. P. 509.
- [15] *Дзльева Е.С., Карасев В.Ю., Петров О.Ф.* // ЖЭТФ. 2012. Т. 141. № 1. С. 189.
- [16] *Karasev B.Yu., Ermolenko M.A., Dzlieva E.S., Pavlov S.I., Novikov L.A., Mashuk I.Ch.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. С. 139–144.
- [17] *Дзльева Е.С., Карасев В.Ю., Эйхвальд А.И.* // Опт. и спектр. 2002. Т. 92. № 6. С. 1018–1023.
- [18] *Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Ivanov A.Yu., Eikhval'd A.I.* // Phys. Rev. E. 2006. Vol. 74. N 6. P. 066403.1–12.
- [19] *Васильев М.М., Дьячков Л.Г., Антипов С.Н., Петров О.Ф., Фортвов В.Е.* // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. № 6. С. 414–419.
- [20] *Дзльева Е.С., Ермоленко М.А., Карасев В.Ю., Павлов С.И., Новиков Л.А., Майоров С.А.* // Письма в ЖЭТФ. 2014. Т. 100. № 11. С. 801–806.
- [21] *Nedospasov A.V.* // Phys. Rev. E. 2009. Vol. 79. P. 036401.
- [22] *Nedospasov A.V.* // EPL. 2013. Vol. 103. P. 25001.
- [23] *Vasiliev M.M., Dyachkov L.G., Antipov S.N., Huijink R., Petrov O.F., Fortov V.E.* // EPL. 2011. Vol. 93. P. 15001.1–6.
- [24] *Dzlieva E.S., Karasev V.Yu., Pavlov S.I.* // EPL. 2015. Vol. 110. P. 55002.
- [25] *Дзльева Е.С., Карасев В.Ю., Машук И.Ч., Павлов С.И.* // ЖТФ. 2016. Т. 86. С. 145–148.

- [26] *Sato N.* // AIP Conf. Proc. 2002. Vol. 649. P. 66.
- [27] *Schwabe M., Konopka U., Morfill G.E.* et al. // Phys. Rev. Lett. 2011. Vol. 106. P. 215004.
- [28] *Thomas E.Jr., Lynch B., Konopka U., Merlino R.L., Rosenberg M.* // Phys. Plasmas. 2015. Vol. 22. P. 030701.1–4.
- [29] *Thomas E. Jr., Konopka U., Lynch B., Adams S., Le Blanc S., Merlino R.L., Rosenberg M.* // Phys. Plasmas. 2015. Vol. 22. P. 113708.
- [30] *Karasev V.Yu., Dзлиева E.S., Pavlov S.I., Novikov L.A., Maiorov S.A.* // IEEE Trans. Plasma. Sci. 2017. Vol. PP. N 99. P. 1–4.
- [31] *Hutchinson I.H.* // New Jour. Phys. 2004. Vol. 6. P. 43.1.
- [32] *Ishihara O., Sato N.* // IEEE Trans. Plasma. Sci. 2001. Vol. 29. P. 179.
- [33] *Tsyrovich V., Vladimirov S.* // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2004. Vol. 32. P. 659.
- [34] *Stepanenko A.A., Krashennnikov S.I.* // Phys. Plasm. 2013. Vol. 20. P. 033702.
- [35] *Krashennnikov S.I.* // Phys. Plasma. 2006. Vol. 13. P. 114502.
- [36] *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
- [37] *Fortov V.E., Usachev A.D., Zobnin A.V., Petrov O.F.* // Phys. Rev. E. 2004. Vol. 70. P. 046415.
- [38] *Fortov V.E., Usachev A.D., Zobnin A.V., Molotkov V.I., Petrov O.F.* // Phys. Plasma. 2003. Vol. 10. P. 1199.
- [39] *Zobnin A.V., Usachev A.D., Fortov V.E.* // AIP Conf. Proc. 2002. Vol. 649. P. 293.
- [40] *Chen F.F.* Electric probes. Plasma diagnostic techniques. NY.: Academic Press, 1965. 200 p.
- [41] *Chan P., Talbot L., Turian K.* Electrical Probes in Stationary and Flowing Plasmas, Theory and Application. Berlin, Heidelberg, NY.: Springer-Verlag, 1975. 197 p.