

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

Volume 6, Number 310 (2016), 59 – 66

UDC 533.92; 621.384.647

M.K. Dosbolayev, A.U. Utegenov, A.B. Tazhen, T.S. Ramazanov, M.T. Gabdullin

IETP, NNLOT, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
merlan@physics.kz

DYNAMIC PROPERTIES OF PULSE PLASMA FLOW AND DUST FORMATION IN THE PULSED PLASMA ACCELERATOR

Abstract. This paper presents the results of the experimental investigation of the pulsed beam characteristics. Dynamic and transport properties of a pulsed plasma flow was considered. With high-speed camera of Phantom v2512 a video plasma beam was held, after the processing, the speed of the pulse stream was determined. Materials with fractal surfaces, similar to materials obtained in tokamaks were obtained.

Keywords: pulse-plasma accelerator, tokamak, candidate material, dusty plasma, fractal structure.

УДК 533.92; 621.384.647

М.К. Досболаев, А.У. Утегенов, А.Б. Тажен, Т.С. Рамазанов, М.Т. Габдуллин

НИИЭТФ, КазНУ им. Аль-Фараби, Алматы, Казахстан

ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА И ПЫЛЕОБРАЗОВАНИЕ В ИПУ

Аннотация. В данной работе представлены результаты по экспериментальному исследованию характеристик импульсного плазменного пучка. Были рассмотрены динамические и транспортные свойства импульсного плазменного потока. С помощью высокоскоростной камеры Phantom версии v2512 проводились видеосъемки плазменного пучка, из которого после обработки была определена скорость импульсного потока. Экспериментально были получены материалы с фрактальными поверхностями, аналогично материалам, получаемых в токамаках, вследствие эрозии.

Ключевые слова: импульсный плазменный ускоритель, токамак, кандидатный материал, пылевая плазма, фрактальная структура.

Введение. Одной из задач физики управляемого термоядерного синтеза, относящихся к управлению потоками плазмы, является минимизация эрозии внутрикамерных деталей, в частности, первой стенки реактора, что приводит к образованию пыли (частиц микронного размера) и наноструктурных продуктов.

Накопление пыли в объеме реактора в основном играет отрицательную роль. Во-первых, это приводит к неустойчивости горения высокотемпературной плазмы и зарождению срывов, во-вторых, к захвату и накоплению трития, что представляет проблему для безопасной эксплуатации реактора и его экономичности [1-5].

На сегодняшний день в качестве кандидатных материалов, обращенных к высокотемпературной плазме, принят углеродный материал или его композит для облицовки в области сепаратрисы в диверторе. Кандидатными материалами называют те материалы, которые могли бы охарактеризовать процессы, происходящие с материалами из которых сделан реактор и для нахождения наилучшего композита, который мог бы заменить материал деталей реактора.

Данная работа посвящена изучению формирования пыли при взаимодействии ускоренного импульсного плазменного потока с графитными пластинами и динамики самого потока. Для имитации и исследования данного процесса был использован плазменный ускоритель коаксиального типа. Ускорители коаксиального типа являются универсальными установками для генерации импульсного плазменного потока и для изучения взаимодействия его с кандидатными материалами первой стенки термоядерных установок.

Экспериментальная установка. Экспериментальная установка импульсного плазменного ускорителя ИПУ-30, собранная в НИИЭТФ, состоит из трех основных частей: системы электродов (плазма образуется в межэлектродном пространстве при подаче на них разрядного напряжения), вакуумной системы и системы конденсаторов (для накопления энергии электрического поля с высоковольтного источника питания). Принципиальная схема установки показана на рисунке 1 [6].

В экспериментах в качестве плазмообразующего газа был использован водород и аргон, напряжение зарядки конденсаторной батареи (C=100 мкФ) ускорителя варьировалось от 3 до 14 кВ.

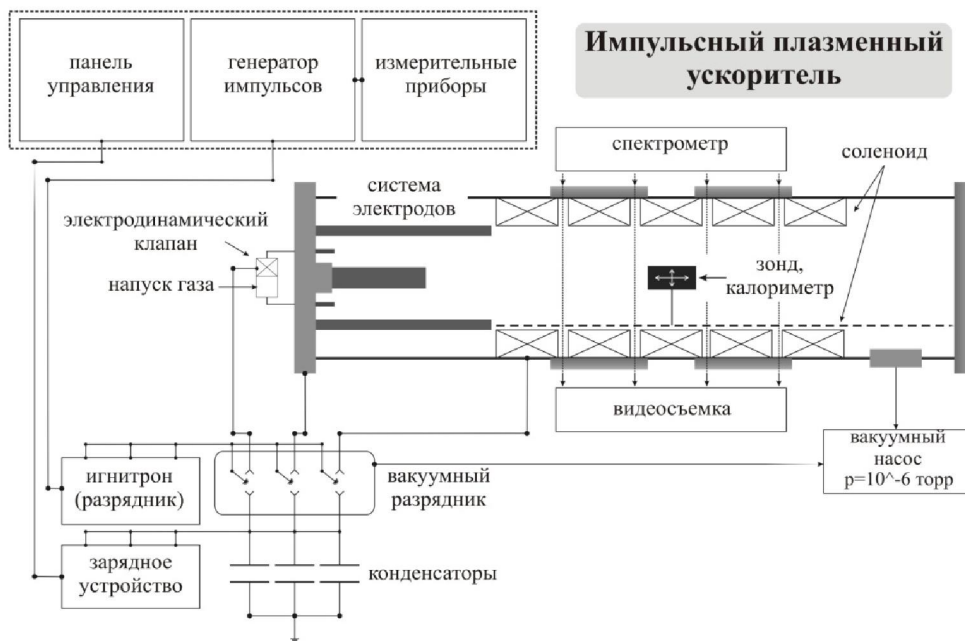


Рисунок 1 – Принципиальная схема импульсной плазменной установки

На рисунке 2 показана принципиальная схема положения мишени и контейнера для сбора материалов эрозии внутри газоразрядного реактора.

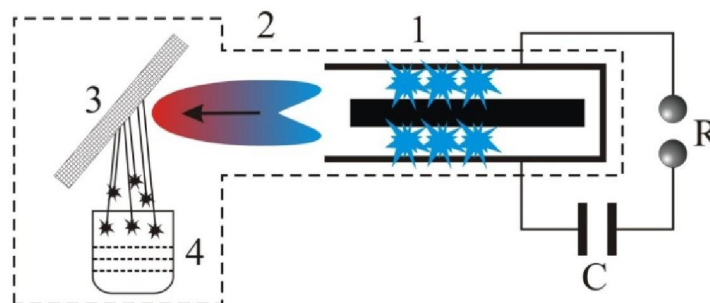


Рисунок 2 – Принципиальная схема экспериментальной установки.

1 – система электродов; 2 – направленный импульсный плазменный поток; 3 – мишень; 4 – контейнер для сборки материалов эрозии

Принцип действия установки основан на ускорении плазменного сгустка (2), сформированного в межэлектродном пространстве при электрическом разряде собственным магнитным полем, воздействием силой Лоренца:

$$\mathbf{F} = \mathbf{j} \cdot \mathbf{B}, \quad (1)$$

эквивалентной магнитному давлению

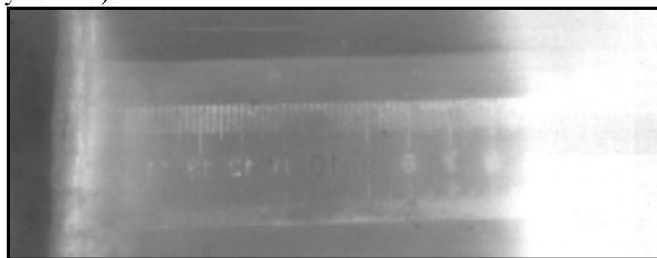
$$P = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (2)$$

где j – плотность тока; B – напряженность магнитного поля; μ_0 – магнитная проницаемость.

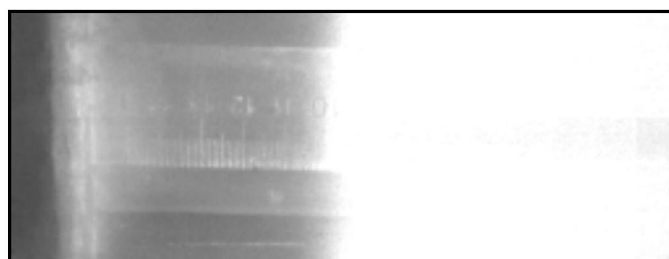
Для этого к коаксиально расположенным электродам (1) прикладывается высокое напряжение, а в рабочей камере создается высокий вакуум, достаточный для развития разряда. Разряд на межэлектродное пространство подается с помощью разрядника (R). Разрядник представляет собой два круглых плоскопараллельных медных дисков, разделенных изолятором из капролона. Вакуум создается отдельным форвакуумным насосом. Пробой вакуумного промежутка осуществляется зажиганием иницирующего искрового разряда на поджигающем электроде. Напряжение для поджига подается от специального источника высоковольтного импульса.

Динамические и транспортные свойства плазменного потока. Исследуя динамические свойства импульсного плазменного потока, нами было рассмотрено движение потока с истечением времени.

На данном этапе работы был исследован перенос плазменного потока, а также были проведены эксперименты по определению скорости. Эксперименты по изучению плазменного потока образованного в ИПУ-30 проводились с помощью высокоскоростной камеры Phantom версии v2512 с максимальной скоростью частоты 677000 кадров в секунду. Для изучения динамики плазменного потока на нашем эксперименте были записаны видеозаписи со скоростью 470000 кадр/сек. Видеосъемка плазменного шнура производилась через световой фильтр. Результаты определения скорости потока показаны на рисунке 3. Видно, что на первом кадре начало пучка было расположено на расстоянии ~ 5 см (рисунок 3а) и на ~ 10 см, как видно из следующего кадра (рисунок 3б).



а)



б)

Рисунок 3 – Фотоизображение плазменного пучка направленного от системы электродов к мишени из графита, которая расположена на расстоянии 16 см: а) – первый кадр; б) – следующий кадр

Таким образом, зная время между последующими кадрами, определялась скорость плазменного потока при напряжении 8 кВ, которая составила ~ 23 км/сек.

Также по результатам видеосъемки был определен диаметр плазменного шнура, который составил ~ 4 см (рисунок 4):



Рисунок 4 – Фотоизображение плазменного шнура

Пылеобразования в ИПУ. В настоящее время трудно не считаться с тем фактом, что во многих современных плазменных энергетических установках, из-за взаимодействия плазмы с поверхностью материалов, в плазму попадают макроскопические частицы (размерами до нескольких сотен микронов) из обрабатываемого материала (или из первой стенки токамака). В результате образуется плазма сложного состава: такую плазму называют пылевой или плазмой с конденсированной дисперсной фазой (обзоры [7-9]).

На работу токамака пыль влияет следующим образом:

- 1) пылинки охлаждают плазму, попадая в центральную часть;
- 2) частицы пыли инициирует малые вихри в периферийной плазме, усиливают транспорт частиц и энергии на стенку, тем самым способствуют охлаждению плазмы и срыва плазменного шнура;
- 3) стабилизация разряда за счет инжекции пыли или инертных газов.

В связи с этим, изучение пылевой плазмы направлено на исследование процесса зарядки частиц, структуры и устойчивости плазменно-пылевых образований. Много внимания ученых в сфере физики плазмы уделяется выяснению характера взаимодействия пылевых макрочастиц между собой, а также сил, действующих на макрочастицу со стороны окружающей ее плазмы.

Также срывы разряда в токамаках являются серьёзной проблемой, ограничивающей срок их службы. Поэтому к исследованию срывов разряда посвящено немало научных работ. Так, например, в работе [10] представлены результаты экспериментальных исследований влияния напуска благородных газов на динамику развития срыва разряда в токамаке Т-10. В экспериментах срывы разряда вызывались разными способами: наращиванием плотности плазмы до предельной и/или инжекцией дейтериевой или примесной (углеродной) макрочастицы. Обнаружено, что спад тока при срыве разряда в Т-10 происходит в две фазы, которые отличаются существенно друг от друга разными характерными временами.

На основе вышеуказанного можно твердо утверждать насколько важны знания о механизмах пылеобразования в термоядерных установках.

В нашем случае для исследования использовался графит как один из кандидатных материалов первой стенки современных термоядерных установок. Пластина из графита (3) была расположена от источника плазмы на расстоянии 10 см, под углом 45 градусов к основной оси, как показано на рисунке 2. Такое расположение мишени сделано с целью более точного моделирования геометрии и процесса эрозии в установках токамак. Методики диагностики и сбора пыли следующие. При взаимодействии ускоренного плазменного сгустка с пластинкой графита на поверхности образуются наноструктурированные пленки и частицы пыли, которые за счет тепловой энергии попадают в контейнер для сбора образцов (4). Были случаи, когда внутри контейнера обнаруживались пленки, вырванные с поверхности графитовой пластины. Внутри контейнера коллектора расположены три секционных фильтра из стальной сетки для предотвращения ухода пыли обратно в вакуумную камеру.

Таким образом, полученные образцы подтверждали образование пленок с сильно развитыми поверхностями и фрактальными пылинками, точно такие же, как в термоядерных установках. На рисунке 5 показана расплавленная область графитовой пластины после облучения двадцати импульсами плазменного сгустка.

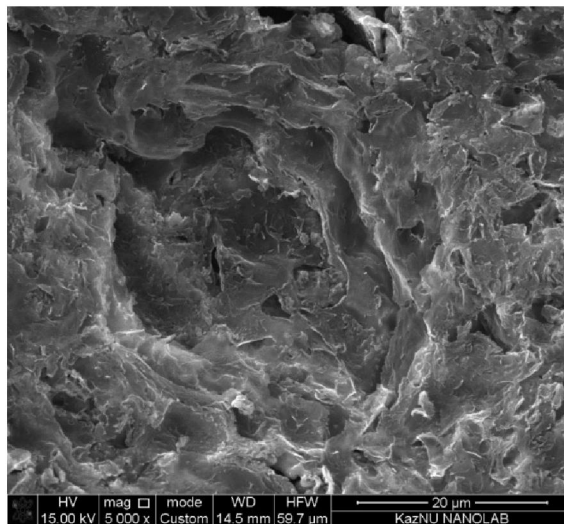


Рисунок 5 – Поверхность графитовой пластины после облучения плазмой

Как видно из рисунка поверхность имеет углубление, которое образовалось во время длительного (повторяющиеся несколько сотен микросекунд) взаимодействия с плазменным потоком. Также видно, что она имеет несколько слоев, то есть является слоистой пленкой.

Теперь рассмотрим пленки и пыли, оторванные от таких мест и упавшие на контейнер, как показано на рисунке 6 – общая картина группы таких пленок и частиц на подложке.

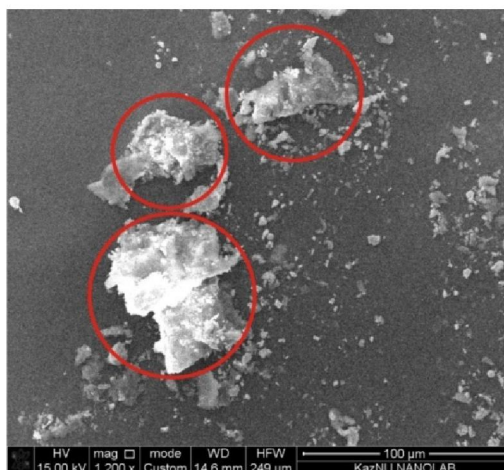


Рисунок 6 – Общий вид пленок и частиц (пыли) с наноструктурированными поверхностями

Красными кружками выделены пленки с наноструктурированными поверхностями. В большинстве случаев пленки с развитым рельефом имеют гранулы с несколькими иерархическими уровнями. Крупные гранулы состоят из более мелких элементов, которые, в свою очередь, состоят из еще более мелких. Такое образование характерно для фрактальных структур. Раньше предполагалось, что образованию такого вида структур способствует появление примеси, например, на поверхности вольфрамовой пленки образовалась фрактальная структура из примеси C, J, Ca Fe, Cr, Cu [11]. Один из примеров фрактальной структуры собственного материала представлен на рисунке 7, которые были получены в ходе данного эксперимента. Также заметно,

что эти структуры состоят из разветвленных структур типа «цветной капусты», рост таких структур может быть связан как с процессом осаждения, так и с процессом диффузии адатомов. Для этого требуется одновременное выполнение следующих условий:

а) Поток атомов должен быть изотропным, температура подложки мала (~300 К).

б) Необходимо наличие начальной неровности, такие условия создаются в наших экспериментах.

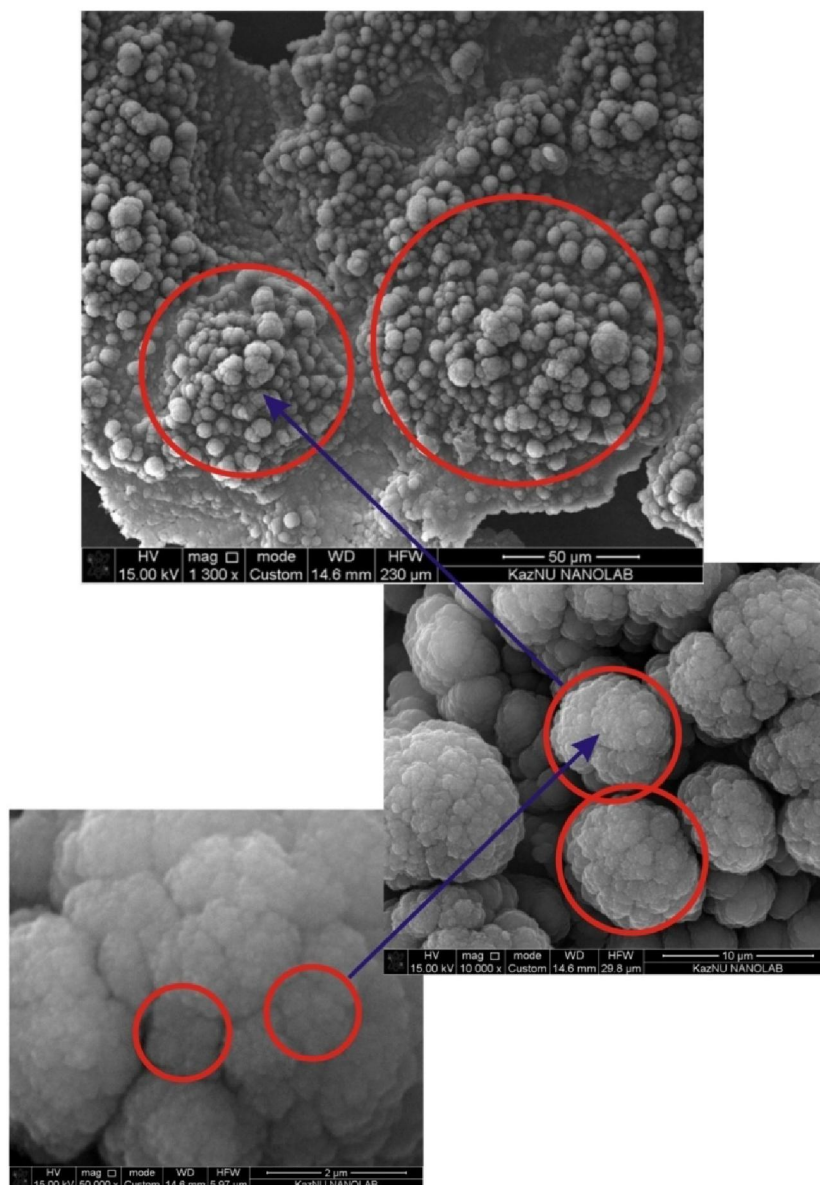


Рисунок 7 – Фрактальная структура частицы графита

Причиной появления пленки с различными рельефами (гладкие, слоистые, с фрактальной структурой) может быть появление устойчивых кластеров, либо в результате флуктуационного образования зародышей критического размера. При высоких температурах поверхности, возможен перенос адатомов к более горячим элементам рельефа (к поверхности пленки) вследствие убывания энергии активации диффузии с ростом температуры. Это способствует образованию развитой структуры на поверхности, как показано на рисунке 8.

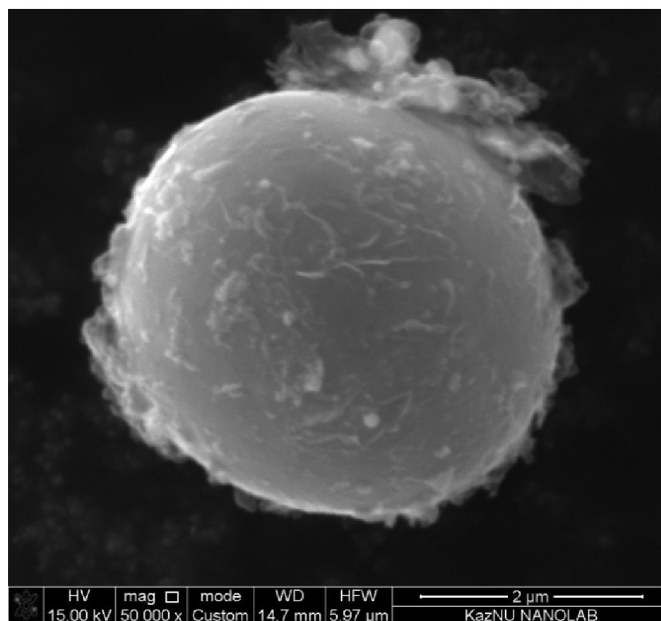


Рисунок 8 – Вид поверхности углеводородных частиц, полученных с помощью электронного сканирующего микроскопа

Кроме того, росту кластеров «снизу-вверх» может способствовать их кристаллическая структура: преимущественно растут кристаллы, у которых ось перпендикулярна грани с наименьшей плотностью (законы Шубникова и Бравэ), а также лучшее закрепление на вершинах кластеров в силу большей кривизны (и следственно, большего количества ловушек для адатомов) таких участков поверхности.

Таким образом, приведенные экспериментальные результаты характеризуют свойства (состав, размеры и т.п.) пленок и пылевых частиц в токамаках и других термоядерных установках. Тем самым дают возможность получать более глубокую информацию об их свойствах и могут объяснить механизмы пылеобразования и образования пленок с сильно развитыми поверхностями.

Заключение. Были исследованы динамические характеристики импульсного плазменного потока в ИПУ-30 с помощью высокоскоростной видеокамеры. В результате было выявлено, что импульсный плазменный поток имеет скорость ~ 23 км/сек с диаметром плазменного сгустка ~ 4 см при напряжении 8 кВ. Также были получены образцы, подтверждающие образование пленок с сильно развитыми поверхностями и фрактальными пылинками, точно такие же, как в термоядерных установках. Выявлено, что образование фрактальных структур, состоящие из разветвленных структур типа «цветной капусты», связаны с процессом диффузии адатомов.

Работа была выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках гранта 3112/ГФ4.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J.C. Flanagan, M. Sertoli, M. Bacharis et al. Characterising dust in JET with new ITER-like wall // Plasma physics and controlled fusion. – 2015. – 57. – 014037.
- [2] V.I. Crauz., Yu.V. Martinenko, N. Yu. Svechnikov, V.P. Smirnov, V.G. Stankevich, L.N. Khimchenko. Nanosturctures in controlled fusion devices // Uspek. Phys. Nauk. – 2010. – 180. P. 1055-1080.
- [3] G. Federici, C.H. Skinner et al. Plasma-material interactions in current tokamaks and their implications for next step fusion reactors // Nuclear Fusion. – 2001. – 41. – P. 1967-1979.
- [4] Yu.V. Martinenko, M. Yu. Nagel Formation of dust in TOKAMAK (ser. Thermonuclear fusion.). – 2009. – P. 65-72.
- [5] H-W. Bartels et al. Accident Analysis Specifications for GSSR // Safety, Environment and Health Group. Garching ITER Joint Central Team. – 2000.
- [6] A.U. Utegenov, A.B. Tazhen, M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov. Experimental investigation of the interaction of plasma flow with the wall of fusion reactor // 21st International symposium on Heavy Ion Inertial Fusion. Book of abstracts. – 2016. – P. 53.
- [7] Форгов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. Пылевая плазма // УФН. – 2004. – № 174. – С. 495-544.

- [8] Shukla P.K. and Mamun A.A. Introduction to Dusty Plasma Physics. // Series in Plasma Physics. – London: Institute of Physics Publishing. – 2002. – P. 123-165.
- [9] Thomas H.M., Morfill G.E. Melting dynamics of a plasma crystal // Nature. – 1996. – Vol.379. – P. 806-809.
- [10] Дрёмин М.М., Капралов В.Г., Кислов А.Я., Кислов Д.А., Крупин В.А., Крылов С.В., Кулепин Э.О. и др. Влияние напуска благородных газов на срыв разряда в токамаке Т-10 // ВАНТ. – Сер. Термоядерный синтез. – 2012. – вып. 4. – С. 58-70.
- [11] Крауз В.И., Мартыненко Ю.В., Свечников Н.Ю., Смирнов В.П., Станкевич В.Г., Химченко Л.Н. Наноструктуры в установках управляемого термоядерного синтеза // УФН. – 2010. – Т.180. – С. 1055-1080.

REFERENCES

- [1] J.C. Flanagan, M. Sertoli, M. Bacharis et al. Characterising dust in JET with new ITER-like wall // Plasma physics and controlled fusion. **2015**, 57, 014037.
- [2] V.I. Crauz., Yu.V. Martinenko, N. Yu. Svechnikov, V.P. Smirnov, V.G. Stankevich, L.N. Khimchenko. Nanosturctures in controlled fusion devices // Uspek. Phys. Nauk, **2010**, 180, P. 1055-1080.
- [3] G. Federici, C.H. Skinner et al. Plasma-material interactions in current tokamaks and their implications for next step fusion reactors // Nuclear Fusion, **2001**, 41, P. 1967-1979.
- [4] Yu.V. Martinenko, M. Yu. Nagel Formation of dust in TOKAMAK (ser. Thermonuclear fusion.), **2009**, P. 65-72.
- [5] H-W. Bartels et al. Accident Analysis Specifications for GSSR // Safety, Environment and Health Group. Garching ITER Joint Central Team, **2000**.
- [6] A.U. Utegenov, A.B. Tazhen, M.K. Dosbolayev, T.S. Ramazanov. Experimental investigation of the interaction of plasma flow with the wall of fusion reactor // 21st International symposium on Heavy Ion Inertial Fusion. Book of abstracts. **2016**, P. 53.
- [7] Форгов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. Пылевая плазма // УФН, **2004**, № 174. С. 495-544.
- [8] Shukla P.K. and Mamun A.A. Introduction to Dusty Plasma Physics. // Series in Plasma Physics. – London: Institute of Physics Publishing, **2002**, P. 123-165.
- [9] Thomas H.M., Morfill G.E. Melting dynamics of a plasma crystal // Nature, **1996**, Vol.379. P. 806-809.
- [10] Дрёмин М.М., Капралов В.Г., Кислов А.Я., Кислов Д.А., Крупин В.А., Крылов С.В., Кулепин Э.О. и др. Влияние напуска благородных газов на срыв разряда в токамаке Т-10 // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, **2012**. вып. 4. С. 58-70.
- [11] Крауз В.И., Мартыненко Ю.В., Свечников Н.Ю., Смирнов В.П., Станкевич В.Г., Химченко Л.Н. Наноструктуры в установках управляемого термоядерного синтеза // УФН. **2010**. Т.180. С. 1055-1080.

М.К. Досболаев, А.У. Утегенов, А.Б. Тажен, Т.С. Рамазанов, М.Т. Габдуллин

ИМПУЛЬСТІК ПЛАЗМАЛЫҚ АҒЫННЫҢ ДИНАМИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ МЕН ИМПУЛЬСТІ ПЛАЗМАЛЫҚ ҮДЕТКІШТЕГІ ТОЗАҢНЫҢ ПАЙДА БОЛУЫ

Аннотация. Берілген жұмыста импульсті ағынның сипаттамаларын эксперимент жүзінде зерттеу нәтижелері келтірілген. Импульсті плазмалық ағынның динамикалық және транспорттық қасиеттері қарастырылған. Phantom v2512 версиялы жоғары жылдамдықты камера арқылы плазмалы ағын таспаға түсіріліп, нәтижелерді өңдеу арқылы импульсті ағынның жылдамдығы анықталды. Эксперимент жүзінде токамактарда алынатын материалдарға сәйкес фрактал бетті материалдар алынды.

Түйін сөздер: импульсті плазмалық үдеткіш, токамак, кандидаттық материал, тозаңды плазма, фракталды құрылым.

Сведения об авторах:

Досболаев М.К. – Ассоциированный профессор, КазНУ им. аль-Фараби, Алматинская обл., поселок Кокозек, ул. Жибек-жолы, д.29а, Аль-Фараби 71а, физ-тех, 125 каб. +77022144020 merlan@physics.kz.

Утегенов А.У. – Научный сотрудник, НИИЭТФ при КазНУ им. аль-Фараби, Аль-Фараби 71а, физ-тех, 121 каб, +7(707)-112-35-74 almasbek@physics.kz;

Тажен А.Б. – Лаборант, НИИЭТФ при КазНУ им. аль-Фараби, Аль-Фараби 71а, физ-тех, 118 каб, +7(747)-706-74-06 aigerim_tzh@mail.ru;

Рамазанов Т.С. – профессор, член корр. НАН РК, КазНУ им. аль-Фараби, Аль-Фараби 71а, физ-тех, 331 каб., 240-46-28, 292-58-66(22-21) ramazan@physics.kz;

Габдуллин М.Т. – ст. преподаватель, КазНУ им. аль-Фараби, Аль-Фараби 71а, физ-тех, 427 каб, gabdullin@physics.kz;