

М. Н. Булаева, А. П. Кирпичников, И. В. Кравченко, Х. В. Лёб,  
П. Е. Машеров, В. А. Рябый, Д. П. Ткаченко

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ЗОНДОВОЙ ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

*Ключевые слова:* зонд Ленгмюра, плазма, зондовые возмущения, ВЧ наводки, проводящее тело.

*Выявлен новый источник возмущений, вносимых в плазму зондом Ленгмюра. Возмущение возникает при использовании неизолированного металлического экрана, окружающего зондодержатель. При контакте экрана с плазмой, потенциал пространства которой в общем случае неоднороден, в экран отбирается часть плазменного тока, которая уменьшает плазменный ток (газового разряда или амбиполярной диффузии) и снижает степень ионизации плазмы. При этом экран уподобляется короткозамкнутому, несимметричному двойному макро-зонду. Понимание сути механизма нового возмущения дало путь к его минимизации, состоящий в необходимости электрически изолировать экран от плазмы.*

*Keywords:* Langmuir probe, plasma, probe perturbations, RF interference, conducting body.

*New source of plasma perturbations caused by a Langmuir probe is disclosed. The phenomenon appears when a bare metal screen surrounding a probe-holder is incorporated. While in contact with plasmas that generally have a non-uniform space potential distribution, the screen diverts a portion of plasma current (discharge or ambipolar one) which is reduced lowering plasma ionization degree. In this situation the probe-holder's screen behaves like a short-circuited, asymmetric double macro-probe. Understanding the essence of a new perturbation mechanism gives the way to its minimization: one has to insulate the screen from plasma.*

### Введение

Диагностика плазмы с использованием зондов Ленгмюра относится к контактным методам, вносящим определённые возмущения в исследуемую среду, приводящие к ошибкам измерений. Общеизвестно значительное число источников таких возмущений, основными из которых являются [1, 2]: а) повышенный уровень зондового тока, если собирающая поверхность зонда велика; б) увеличенный диаметр первого зондодержателя, обедняющий плазму зарядами за счёт амбиполярной диффузии к нему заряженных частиц плазмы; в) повышенный уровень ВЧ наводок на призондовом слое объёмного заряда при исследовании ВЧ плазмы. В настоящей работе выявлен ещё один источник зондовых возмущений плазмы, вносимый неизолированным металлическим экраном зондодержателя. Насколько известно авторам, такой вид зондовых возмущений плазмы ранее в литературе не обсуждался.

### Новый источник зондовых возмущений плазмы

Данный источник возмущений возникает при введении зонда Ленгмюра в плазму с помощью зондодержателя, окружённого неизолированным металлическим экраном с целью защиты зондового вывода от ВЧ наводок, искажающих характеристику зонда. Такое экранирование применяется во многих экспериментах — см., например, [2, 3, 4]. Ту же функцию выполнит экран зондодержателя при исследовании плазмы разрядов постоянного тока для защиты зондовой системы от лабораторных наводок типа сварки или искрения электропроводки.

Авторами было замечено, что при введении в плазму зонда с зондодержателем, имеющим неизолированный металлический экран, реализуется известный случай гальванического контакта с плазмой крупного проводящего тела, который рассматривался в ряде работ [5-9]. В этих исследованиях было показано вначале феноменологически [5, 6], а затем

и экспериментально [7-9], что в данной ситуации проводящее тело уподобляется «несимметричному, короткозамкнутому двойному макро-зонду», который принимает плавающий потенциал, немного превышающий минимальное значение из охваченного проводящим телом диапазона величин плавающего потенциала. При этом степень ионизации окружающей плазмы должна снизиться более глубоко, чем при отсутствии экрана, когда ионизация плазмы, окружающей диэлектрическое тело, ослабляется только за счёт амбиполярной диффузии к нему заряженных частиц и последующей рекомбинации на поверхности диэлектрика. Причина дополнительной деионизации плазмы зондовым экраном кроется в том, что: 1) ток короткого замыкания «зонда» протекает по проводящему телу и замыкается в прилегающей к нему плазме, уменьшая плазменный ток (ток газового разряда или амбиполярной диффузии) за счёт вычитания из него; 2) практически вся собирающая поверхность «зонда» подвергается бомбардировке положительно заряженными ионами, причём на поддержание этого процесса расходуется определённая часть энергосодержания плазмы. Оба канала утечки энергии плазмы нагревают проводящее тело.

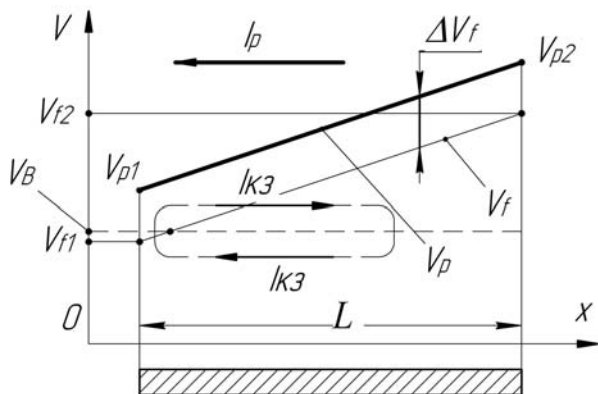
### Сущность явлений при контакте крупного проводящего тела с плазмой

Поскольку связь контакта проводящего тела и плазмы с техникой зондовых измерений ранее в литературе не обсуждалась, то перед конкретизацией нового вида зондовых возмущения плазмы представляется разумным рассмотреть физические представления работ [5-9] и аргументацию в пользу их корректности.

#### а) Феноменологический анализ

В общем случае пространственное распределение потенциала плазмы неоднородно: в условиях газового разряда это квазинейтральная ионизованная среда, например, положительный столб разряда,

где изменение потенциала пространства обеспечивает поддержание ионизационного состояния плазмы и протекание тока разряда; в условиях покоящейся плазмы это область амбиполярной диффузии, т.е. плазменного тока к стенке, на которой происходит рекомбинация заряженных частиц. Схема явлений, возникающих при контакте плазмы с проводящим телом длины  $L$ , представлена на рис. 1.



**Рис. 1 - Поведение электропроводящего тела длины  $L$  в гальваническом контакте с плазмой**

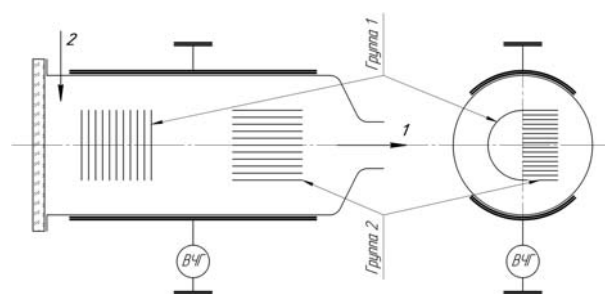
Пусть это тело охватывает часть однородного плазменного образования, в котором потенциал пространства изменяется в диапазоне  $V_{p1} \dots V_{p2}$ , а плавающий потенциал – в диапазоне  $V_{f1} \dots V_{f2}$ . Очевидно, что единый плавающий потенциал проводящего тела  $V_B$ , например, потенциал отрезка металлической трубки, должен оказаться внутри диапазона  $V_{f1} \dots V_{f2}$ . При этом правая часть тела на Рис. 1 оказывается более отрицательной, чем плазма, поэтому она собирает ток положительно заряженных ионов. Левая часть тела становится менее отрицательной, чем плазма, и собирает ток электронов. Оба тока из плазмы должны замкнуться в проводящем теле и в плазме, образуя замкнутый токовый контур с током короткого замыкания  $I_{кз}$ , поэтому они должны стать равными по величине. Такое выравнивание должно происходить самосогласованно, а граница раздела двух частей поверхности тела, соответствующая плавающему потенциалу  $V_B$ , должна автоматически приблизиться к левому краю тела, т.к. для сбора электронного тока, равного ионному току, собираемому правой частью тела, требуется площадка во столько раз меньшая, во сколько подвижность электронов больше подвижности положительно заряженных ионов плазмы. А это различие составляет не менее двух порядков величины. Таким образом, мы должны получить  $V_B \approx V_{f1}$ , а проводящее тело при этом должно стать подобным несимметричному, короткозамкнутому двойному макро-зонду [5]. Физическую сущность такого представления удалось прояснить, введя понятие мнимых однозондовых характеристик двух короткозамкнутых макро-зондов с сильно различающимися собирающими поверхностями [6].

В итоге почти вся поверхность проводящего тела оказывается подверженной ионной бомбардировке, в теле протекает ток короткого замыкания  $I_{кз}$ , который, замыкаясь по окружающей плазме, вычи-

щается из плазменного тока  $I_p$ . Выявленный феноменологическим путём механизм возмущения плазмы может оказаться вполне заметным. Отсюда становится понятным стремление получить экспериментальное подтверждение корректности этих представлений.

#### б) Косвенный эксперимент

Такое подтверждение сделанного вывода было получено вначале из косвенного эксперимента, который состоял в модификации традиционного процесса плазмохимического травления в кислородной плазме фоторезиста (прозрачной органической плёнки), нанесённого на слабо проводящие монокристаллические кремниевые пластины. Суть традиционной технологии, реализованной в промышленной установке плазмохимического удаления фоторезиста 08ПХО-100Т-001 (реплика зарубежной системы корпорации LFE), показана на схеме (рис. 2).



**Рис. 2 - Схема двух вариантов группового процесса плазмохимического удаления фоторезиста в установке 08ПХО-100Т-001: вдоль разряда (группа 1) и поперёк разряда (группа 2)**

Здесь пластины диаметром 50 мм с плёнкой фоторезиста загружались в составе группы 1 в кварцевую трубу (по-английски трубу называют *barrel*, т.е. ствол, поэтому реактор данного типа называется баррельным), в которой с помощью двух продольных внешних электродов возбуждался поперечный ВЧ емкостной разряд на частоте 13,56 МГц. Этот реактор откачивался через торцевой патрубок по стрелке 1, а плазмообразующий газ – кислород подавался по стрелке 2. В результате динамическое давление в реакторе устанавливалось на уровне 0,5...0,8 Торр. При наличии на кремниевых пластинах под фоторезистом МОП структур (структуры металл – окисел  $\text{SiO}_2$  - полупроводник, где окисел выполнял роль подзатворного диэлектрика полевых транзисторов) и при уменьшении толщин окисла до уровня ~100 нм часть этих структур стала погибать в процессе удаления фоторезиста из-за электрических пробоев подзатворного диэлектрика. При толщине окисла ~20 нм в традиционном процессе погибали почти все МОП структуры на пластинах.

Для преодоления этой трудности авторами приведённого выше феноменологического анализа было предложено развернуть пластины на 90 градусов в виде групп 2, показанных на Рис. 2. В результате пробой МОП структур с окислом толщин 100...20 нм прекратился, а некоторые структуры, считавшиеся дефектными по токовым утечкам перед плазменной обработкой, оказались восстанов-

ленными [7, 8]. Устранение пробоев МОП структур, составлявшее главную цель модификации стандартного процесса, легко объясняется тем, что развёрнутые пластины групп № 2 оказались практически на эквипотенциалах ВЧЕ разряда. При этом перепад потенциала плазмы вдоль пластин резко уменьшился, и разности потенциалов на подзатворном диэлектрике МОП структур понизились до уровня, обеспечившего целостность подзатворных диэлектриков. Полученный результат подтвердил справедливость приведённых выше феноменологических представлений.

Что касается «залечивания» дефектных структур, то этот эффект, оказавшийся приятной неожиданностью для участников эксперимента, поставил задачу для будущих исследований.

#### в) Прямой эксперимент

Экспериментальное подтверждение авторских представлений было организовано в [9] следующим образом. Исследуемым объектом послужила свободная струя плазмы, создаваемая в вакуумной камере высокоресурсным электродуговым плазматроном постоянного тока [10] при динамическом давлении в камере порядка 3 Торр. Этому давлению соответствовали следующие расходы рабочих тел плазматрона: расход воздуха через боковой технологический канал составил 10 нл/мин, а расход защитного аргона в электродуговой камере – 3 нл/мин. Схема эксперимента представлена на Рис. 3:

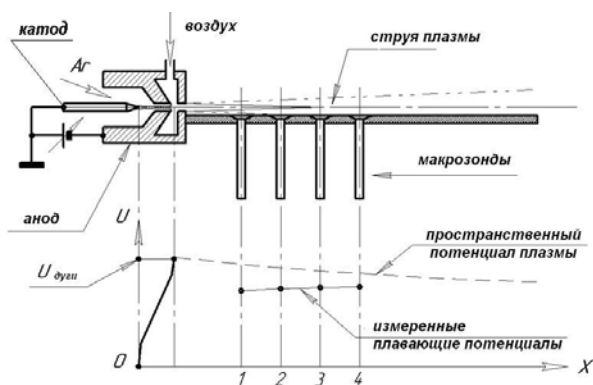


Рис. 3 - Схема эксперимента [9] при токе дуги 50 А и напряжении 14,5 В

В струю плазмы была введена фторопластовая пластина, размещённая параллельно оси струи со смещением относительно неё на 2 мм. В пластине на линии, параллельной оси струи, были установлены с шагом в 10 мм четыре неподвижных пристеночных зонда в виде металлических дисков диаметра 4 мм, установленных заподлицо с пластиной. Измерялись плавающие потенциалы зондов относительно заземлённого катода плазматрона (рис. 3). Качественная картина полученных результатов представлена на графике рис. 3.

Потенциалы зондов измерялись компенсационным методом, обеспечившим выявление закономерности распределения  $U(x)$ . Далее крайние зонды №№ 1 и 4 были закорочены через амперметр. Плавающий потенциал образовавшегося таким образом

короткозамкнутого и несимметричного по параметрам плазмы двойного зонда в пределах погрешности измерений оказался равен плавающему потенциалу зонда № 1 (11,4 В), показавшего минимальный плавающий потенциал на изучаемом участке плазмы. Ток короткого замыкания такого двойного макрозонда составил величину порядка 100 мкА. Этот результат и представляет собой прямое экспериментальное подтверждение обсуждаемого физического явления, при котором короткозамкнутый зонд 1-4 отбирает от плазменной струи ток  $I_{КЗ}=100$  мкА, направленный навстречу плазменному току  $I_p$  в зоне около пристеночных зондов, как это показано на рис. 1.

Измеренный в данном эксперименте ток  $I_{КЗ}$  уменьшает плазменный ток  $I_p$ , т.е. снижает энергоёмкость плазмы и, следовательно, степень ионизации и концентрацию электронов плазмы. В этом и состоит обсуждаемое зондовое возмущение параметров измеряемой среды.

В заключение эксперимента [9] была зарегистрирована вольт-амперная характеристика двойного зонда 1-4:

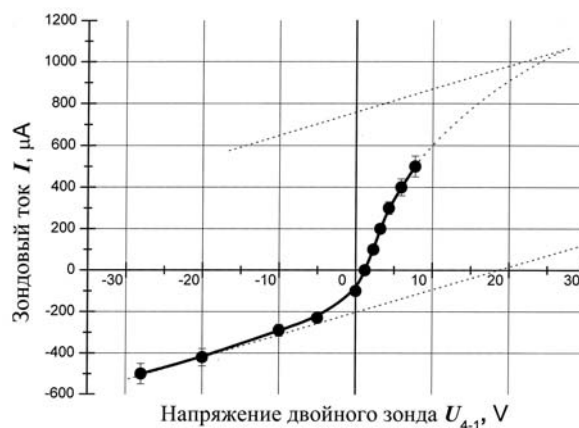


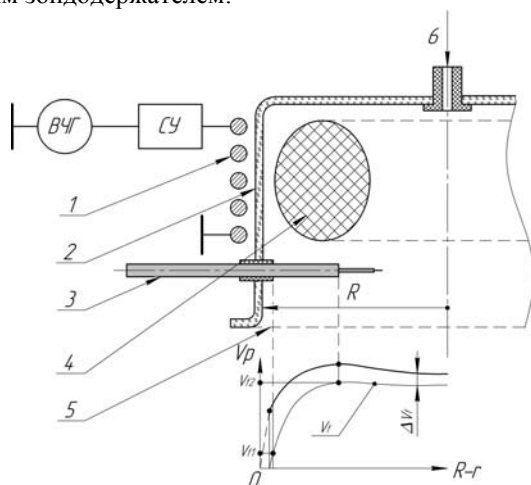
Рис. 4 - Измеренная вольт-амперная характеристика двойного зонда 1-4 (ток дуги 50 А, напряжение 14,5 В)

Эту характеристику, полученную в эксперименте 2006 года, можно сравнить с умозрительно построенной в 1995 году характеристикой несимметричного двойного макрозонда, которому было уподоблено проводящее тело в контакте с плазмой [8]. Их качественное согласие несомненно, что подтверждает корректность зондовой интерпретации [5-9] контакта с плазмой крупного проводящего тела.

#### Пример зондовой диагностики ВЧИ плазмы

В качестве практического примера организации зондовых измерений рассмотрим постановку зондовой диагностики плазмы ВЧ индукционного (ВЧИ) разряда. Предположим, что экранированный зонд вводится в газоразрядную камеру (ГРК) ВЧИ источника ионов, в торце которого размещается ионно-оптическая система (ИОС), состоящая из двух или трёх перфорированных электродов, предназначенных для извлечения из плазмы положительно заряженных ионов и их дальнейшего элект-

тростатического ускорения На Рис. 7 представлена схема такого устройства с цилиндрического индуктором 1, окружающим диэлектрическую ГРК 2, в которую радиально вводится зонд 3 с экранированным зондодержателем:



**Рис. 5 - ВЧИ источник ионов с радиально введенным зондом Ленгмюра**

При подаче на индуктор переменного напряжения ВЧ генератора ВЧГ через согласующее устройство СУ в ГРК возбуждается индукционный разряд 4, заполняющий плазмой полость ГРК, ограниченную ИОС (на Рис. 5 изображён её эмиссионный электрод 5). Движение плазмы в сторону ИОС обеспечено подачей газообразного рабочего тела через форсунку 6. Здесь же показана качественная схема радиального распределения потенциала пространства  $V_p$  в плоскости ввода зонда Ленгмюра.

На Рис. 5 зонд Ленгмюра показан в таком положении, при котором его экран охватывает весь радиальный перепад потенциала плазмы  $V_p$ . Очевидно, что изменению потенциала плазмы  $V_p$  соответствует подобный график плавающего потенциала  $V_\phi$ , изменяющегося в диапазоне  $V_{\phi 1} \dots V_{\phi 2}$ . При этом плавающий потенциал зонда должен находиться в этом диапазоне и несколько превышать минимальный потенциал  $V_{\phi 1}$ . Таким образом возникает короткозамкнутый несимметричный двойной макро-зонд, ток короткого замыкания которого внесёт в плазму описанное выше возмущение.

По поводу этого возмущения отметим, что в ситуации по Рис. 5 электроны уходят из плазмы весьма локально, вблизи подвижного вакуумного уплотнения, через которое зонд вводится в плазму. Этот отбор зарядов плазмы, удалённый от зоны измерений, едва ли сильно исказит их результаты. Отбор ионов из плазмы неравномерен вдоль зондового экрана и достигает максимума на кромке экрана, обращённой к зонду. Эта особенность должна быть более опасной, особенно если кромка экрана приближена к зонду для уменьшения ВЧ наводок на зондовом выводе.

#### **Минимизация нового вида возмущения плазмы**

Понимание физической сущности возмущения плазмы, вносимого неизолированным зондовым

экраном, немедленно приводит к формулировке способа устранения этого нежелательного явления: зондовый экран необходимо изолировать снаружи, например, нанесением на него диэлектрического покрытия или помещения его в диэлектрическую трубку, например, керамическую. При этом диэлектрик примет имеющееся в плазме распределение плавающих потенциалов, которое сохранится на покрытии в силу отсутствия токов перетечки в диэлектрике.

#### **Заключение**

В статье выявлен новый вид возмущений, вносимых зондом Ленгмюра в случае экранировки его зондодержателя неизолированным металлическим экраном (особенно часто такие экраны применяются при диагностике ВЧ плазмы). Они защищают зондовую цепь от случайных внешних наводок типа сварки и искрения также и при изучении газового разряда постоянного тока. Рассмотрено взаимодействие зондового экрана как крупного проводящего тела в контакте с реальной плазмой, потенциал пространства которой не остаётся постоянным. Проанализирована физика такого взаимодействия, описанная в ряде ранее выполненных работ. Показана корректность изложенного в них понимания сути явления, достигнутого вначале на основе доводов здравого смысла, а затем и по результатам косвенных и прямых экспериментов. Приведён конкретный пример взаимодействия зондового экрана с плазмой ВЧ индукционного разряда. В заключение показано, что понимание физики данного явления немедленно указывает путь к устранению нового зондового возмущения плазмы, состоящий в электрической изоляции зондового экрана.

Возникновение подобного рода эффектов возможно в любых плазменных устройствах, где имеются металлические или другие проводящие детали в контакте с плазмой, например, описанных в цикле работ [11, 12]. В этом состоит универсальная полезность данной работы.

#### **Выводы**

1. Рассмотрение реально применяемых конструкций зондов в свете ранее изучавшегося явления отбора плазменного тока в крупное, гальванически контактирующее с плазмой проводящее тело выявило новый вид возмущений, вносимых в исследуемую среду зондами Ленгмюра, зондодержатель которых имеет неизолированный экран.

2. Выявление физической сущности нового вида зондового возмущения позволило сформулировать простой способ борьбы с этим нежелательным явлением: необходимо электрически изолировать от плазмы экран зондодержателя.

*Работа выполнена в рамках гранта Правительства РФ по государственной поддержке научных исследований, проводимых под руководством веду-*

### Литература

1. В.Л. Грановский, *Электрический ток в газе, т. 1. Общие вопросы электродинамики газов*. ГИТТЛ, Москва-Ленинград, 1952, С. 253-282.
2. V.A. Godyak, V.I. Demidov, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44**, paper No. 233001 (2011).
3. V.A. Godyak, B.M. Alexandrovich, V.I. Kolobov, *Phys. Rev. E*, **64**, paper No. 026406 (2001).
4. V.A. Godyak, R.B. Piejak, B.M. Alexandrovich, *Plasma Sources: Science and Technology*, **11**, (2002), P. 525-543.
5. П.П. Кулик, В.А. Рябый, Н.В. Ермохин, *Неидеальная плазма*. ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, Москва, 1984, С. 75-77.
6. В.Н. Бойных, Б.Г. Бородач, В.В. Воробьёв, И.С. Граф, Л. Ю. Захарова, С. О. Изидинов, М.И. Кондаков, В.А. Рябый, А.А. Спорыхин, А.В. Стебунов, *Применение плазмы и плазмохимических технологий для промышленного производства полупроводников.- Обзор Министрства электротехники СССР, серия 05, выпуск 3 (13)*. ИНФОРМЭЛЕКТРО, Москва, 1987, С. 11-13.
7. N.A. Iermolova, A.V. Maliarov, V.A. Riaby, V.P. Savinov, A.A. Sporykhin, L.N. Scheiko, V.G. Yakunin, *XX International Conference on Phenomena in Ionized Gases* (Il Ciocco, Italy, 1991). Invited Papers. Felici Editore, Pisa, 1991. Volume 1. P. 325-326.
8. A.F. Alexandrov, V.A. Riaby, V.P. Savinov, V.G. Yakunin, *XI International Conference on Gas Discharges and their Applications* (Tokyo, September 1995). Invited Papers. Tokyo, 1995. Part 1. P. 498-502.
9. H.-J. Lee, V.A. Riaby, V.Yu. Plaksin, International Conference on Advanced Technologies (Cheju, 2006). Invited Papers. Cheju National University, Cheju, 2006. P.11-20.
10. H.-J. Lee, Y.-S. Mok, V.Yu. Plaksin, V.A. Riaby, Международный патент WO2007/114556 (2007).
11. Гайнуллин, А.Р. Герке, А.П. Кирпичников *Измерение параметров низкотемпературной плазмы высокочастотного разряда магнитным зондом* // Вестник Казанского технологического университета. – Казань: КГТУ, 2007. – №3-4. – С. 130–134.
12. Р.Н. Гайнуллин, А.Р. Герке, А.П. Кирпичников *Расчёт параметров низкотемпературной плазмы высокочастотного индукционного разряда* // Вестник Казанского технологического университета. – Казань: КГТУ, 2007. – №3-4. – С. 154–160.

© М. Н. Булаева – инж. Московского авиац. ин-та (МАИ); А. П. Кирпичников – д-р физ.-мат. наук, проф., зав. каф.м интеллектуальных систем и управления информационными ресурсами КНИТУ, kirpichnikov@kstu.ru; И. В. Кравченко – канд. техн. наук, доцент МАИ; Х. В. Лёб – д-р философии (PhD), проф., рук. лаб. ВЧ ионных двигателей МАИ; П. Е. Машеров – асп. МАИ; В. А. Рябый – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаб. ВЧ ионных двигателей МАИ; Д. П. Ткаченко – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Военного ин-та МАИ.