

## Модельные экспериментальные исследования одиночных и блочных сверхзвуковых струй

*А.Е.Зарвин, В.В.Каляда, А.С. Яскин, К.А.Дубровин, В.Э.Художитков, С.Т.Чиненов*  
*Новосибирск, Новосибирский государственный университет;*  
*Новосибирск, НГУ, ул. Пирогова, 2.*  
*E-mail: zarvin@phys.nsu.ru*

*В настоящей работе представлены экспериментальные исследования сверхзвуковых струй, истекающих из сверхзвуковых сопел в вакуум и в сильно разреженную среду. Приведены результаты спектральных измерений плотности по свечению, возбужденному сфокусированным электронным пучком, продольных и поперечных профилей плотности струй с использованием современной сканирующей техники, а также фотографических изображений струй при использовании техники сканирование электронного пучка. Обсуждены возможности и особенности каждого метода регистрации.*

*Model experimental studies of single and block supersonic jets. A.E. Zarvin, V.V. Kalyada, A.S. Yaskin, K.A. Dubrovin, V.E. Khudozhitkov, S.T. Chinenov. Experimental studies of supersonic jets that flow from supersonic nozzles to vacuum and into a highly rarefied background are presented. The results of spectral measurements of the luminescence intensity excited by a focused electron beam, longitudinal and transverse density profiles of jets using modern scanning techniques, as well as photographic images of jets using the electron beam scanning technique are presented. The possibilities and peculiarities of each registration method are discussed.*

### 1. Введение

Перспективы развития аэрокосмической техники в настоящее время связаны с разработкой нового поколения космических аппаратов, В том числе это касается микроаппаратов формата SmallSat CubeSat в связи с их простотой, низкой стоимостью изготовления и вывода в космос. Использование таких спутников приведет к существенному расширению научных и прикладных исследований. В ближайшее десятилетие ожидается запуск до 10тыс. спутников CubeSat. Судя по публикациям, исследования в этом направлении проводятся в США, Нидерландах, Японии, Китае.

Активно обсуждается проблема создания двигателей управления и ориентации для этих спутников. Создание таких аппаратов невозможно без решения ряда фундаментальных научных задач, связанных с газовой динамикой высокоскоростных потоков, которые являются критически важными для создания будущих образцов аэрокосмической техники. Экспериментальное моделирование в данной области позволит воспроизвести и изучить распределение течений, газодинамическое взаимодействие струй между собой и с элементами конструкции космических аппаратов.

Исследования на экспериментальных установках требуют определения условий моделирования истечения струй двигателей космических аппаратов по параметрам сверхзвукового сопла и рабочего газа. Реальные струи двигателей являются источниками высокотемпературных продуктов горения, воспроизведение для которых отношения удельных теплоемкостей при переходе к «холодным» струям модельного газа практически нереализуемо. Поэтому для моделирования необходимо определение критериев подобия, по которым осуществляется приближенное моделирование натурального процесса истечения струи. Принято выбирать геометрию сопла, число Маха  $M_a$  на срезе сопла, род газа и его температуру  $T$ , давление торможения  $P_0$ , давление в выходном сечении сопла ( $P_a$ ), расход газа при истечении в вакуум  $Q$  или степень нерасчетности  $n = P_a/P_h$  при истечении в затопленное пространство с давлением  $P_h$ . Влияние угла раствора сопла в диапазоне от  $0^\circ$  до  $15^\circ$  при высокой степени нерасчетности в распределении параметров модельного и натурального полей практически не проявляется.

Наиболее серьезные проблемы возникают при выборе моделирующего газа, отношение удельных теплоемкостей  $\gamma = c_p/c_v$  которого могло бы соответствовать  $\gamma$  высокотемпературных продуктов сгорания. Несоответствие этого параметра натурному моделирующему газу приводит к значительным погрешностям при моделировании. Однако переход к интегральным параметрам подобия, предложенным в работах [1-2] дает возможность обойти влияние  $\gamma$  на результаты моделирования. Показано, что параметром подобия для струй, истекающих в вакуум или сильно разреженное пространство, является значение относительного импульса газа на срезе сопла  $\bar{J} = \bar{J}(M_a, \gamma)$  или характерный угол поля течения  $\theta_+ = \theta_+(\bar{J})$ . При равенстве предложенных параметров модельная струя воспроизводит геометрию поля течения натурной струи, и реализуется подобие в распределении основных параметров течения газа [3-4]. Для учета влияния конденсации на процесс истечения при относительно низких температурах торможения рекомендовано использование пониженных значений  $\gamma$ .

Экспериментальное исследование работы реальных двигателей космических аппаратов требует огромных материальных и финансовых затрат. Для моделирования распределения натуральных струйных течений от двигателей и исследования обтекания аппаратов разреженными газами во второй половине прошлого столетия были созданы крупные высокопроизводительные вакуумные установки и комплексы [5-6]. Однако сложность эксплуатации таких комплексов, необходимость больших капитальных вложений для их модернизации и оснащения современными вакуумными откачными системами и средствами диагностики, высокая стоимость каждого экспериментального пуска привели к поиску более простых и дешёвых вариантов экспериментальных исследований интересующих процессов.

В работе [7] на предыдущей, 24-й конференции «Вакуумная наука и техника» нами рассмотрена возможность экспериментального моделирования истечения сверхзвуковых струй из сопел космических аппаратов в условиях вариации давлений разреженной среды и разных составов газовых атмосфер на компактных малотоннажных экспериментальных установках со сравнительно низкой производительностью вакуумных откачных систем. Изложен опыт отдела прикладной физики Новосибирского государственного университета по использованию различных вариантов установок для моделирования газодинамических струй, предложены пути решения возникающих проблем, приведены методики измерений, используемые в экспериментах.

В настоящей работе это оборудование использовано для моделирования процессов, сопутствующих истечению газов из сверхзвуковых сопел, полей течения струй из одиночного сопла и многосоплового блока при истечении газа в вакуум и сильно разреженное пространство.

## **2. Экспериментальное оборудование и методики**

Исследования проведены на многофункциональном газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2 отдела прикладной физики Новосибирского государственного университета [8], предназначенном, в частности, для работы при повышенных расходах газа с сохранением высокого разрежения в рабочей камере. Комплекс обеспечен высоковакуумными высокопроизводительными и безмасляными средствами откачки, позволившими достичь предельной массовой скорости вакуумной откачки по диоксиду углерода  $\sim 0,2$  г/с при давлении окружающего пространства ниже 0,1 Па. Проведение экспериментов на установке требует на порядки меньших затрат энергии и расходуемых материалов, чем на известных крупных газодинамических установках второй половины и конца 20-го века, как в непрерывном, так и в импульсном режимах истечения. Моделирование истечения сверхзвуковых струй газов и газовых смесей проводилось с использованием миниатюрных сопел субмиллиметрового размера.

Аппаратура и диагностические методы, использованные на стенде, основаны на визуализации струй с фиксацией фотографического изображения и спектроскопических методах измерения параметров полей течения при электронно-пучковом возбуждении газа, истекающего из неподвижного или перемещаемого по заданной программе сопла. Электронный луч электронно-оптической системы стенда фокусировался до диаметра менее

1мм. Это позволило получать физически тонкие продольные и поперечные сечения струи для определения их локальной плотности. Для визуализации поля течения струй газов также разработана система диагностирования с использованием современного сканера. Такая система позволила получать развертку изображения газовой струи фактически в режиме on-line.

Уменьшение размеров газовых струй, истекающих из сопел, несколько увеличило методические погрешности, но в то же время упростило диагностику струйных течений для качественных и количественных измерений продольных и поперечных полей плотности невозмущающими методами.

### 3. Анализ полученных результатов

В работе рассмотрены три варианта измерений: фотометрия изучаемых струй; получение плоских продольных и поперечных срезов газовых потоков, а также полей плотности с помощью современной сканирующей системы с представлением полученных результатов в виде иллюстративного материала; измерение полей плотности в струях с помощью электронно-пучковой спектроскопии.

#### 3.1. Фотометрия

В модельных экспериментах используются холодные газовые потоки, соответственно, не светящиеся. В то же время, при истечении в вакуум в сверхзвуковых струях быстро падает плотность, вследствие чего теневые методы исследования, широко применяемые в аэродинамических трубах при моделировании течений при давлениях, соответствующих малым высотам, оказываются непригодными. Поэтому для визуализации таких потоков необходимо возбуждение излучения в струе. В качестве источника возбуждения в большинстве случаев используют высоковольтный электронный пучок [9]. Поскольку в газах электронами с энергией свыше 1 кэВ возбуждаются в том числе долгоживущие уровни, спонтанное излучение можно наблюдать на протяжении всей струи. Вероятность возбуждения при столкновении электронов с атомами или молекулами струи низка, поэтому для более интенсивного свечения электронный пучок максимально приближают к срезу сопла, в область более высокой плотности газа. Пример такой визуализации приведен на рис. 1. Здесь показано свечение струи азота, истекающей из одиночного сверхзвукового конического сопла с параметрами: диаметр критического сечения  $d_* = 0,215$  мм, диаметр выходного среза  $D_a = 3,80$  мм, длина диффузора  $L_{дифф} = 17,0$  мм. Результат получен при давлении торможения  $P_0 = 200$  кПа, давлении фонового газа  $P_h = 8,7$  Па. Параметры возбуждающего электронного пучка: энергия электронов  $E_e = 15$ кэВ, ток пучка  $I_e = 17$  мА. Электронный пучок намеренно расфокусирован для расширения области первичной засветки.

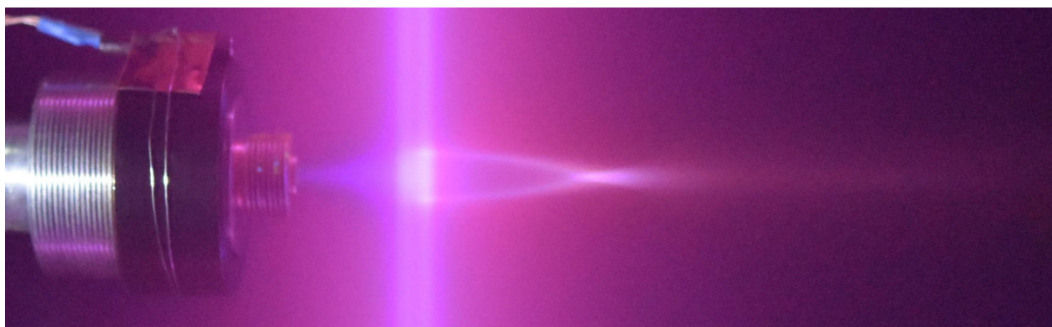
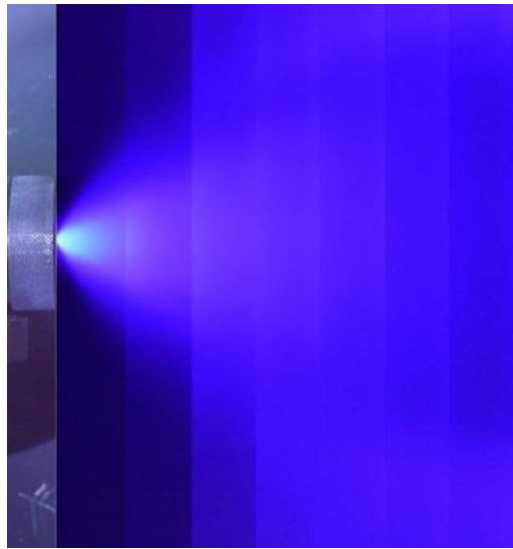


Рис. 1. Сверхзвуковая струя азота. Засветка высоковольтным электронным пучком.

В левой части фотографии хорошо видны элементы форкамеры сопла. Наблюдается веретенообразная структура сверхзвуковой струи, зона смешения (более яркие полосы по бокам), х-образная конфигурация, замыкающая первую бочку. Однако следует учитывать, фотографирование ведется сбоку, и хотя электронный пучок пересекает струю перпендикулярно оси, оценке изменений плотности на разных участках струи препятствует

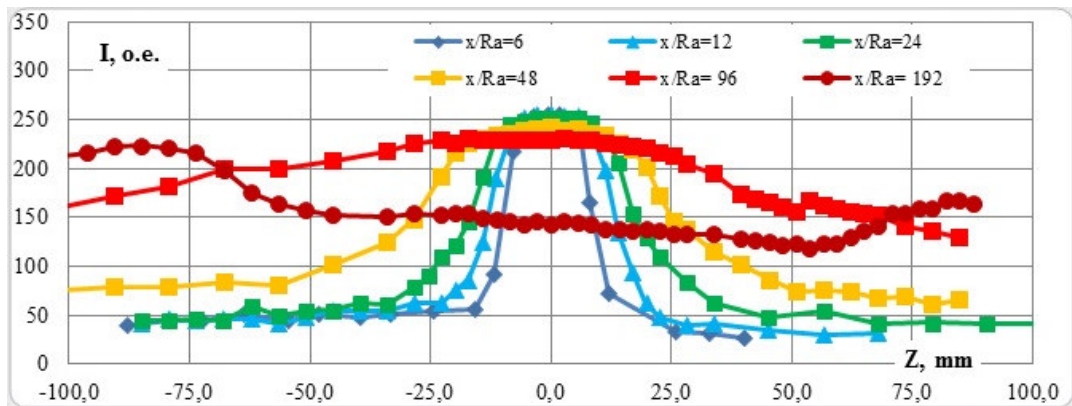
засветка от боковых кромок. Как показал опыт, такие фотографии дают информацию только о форме моделируемых течений, и не могут быть использованы для количественных измерений параметров струй, кроме их геометрических параметров [10].

Иную картину можно наблюдать при использовании хорошо сфокусированного электронного пучка в режиме модулированной развертки. В этом режиме электронный пучок колеблется относительно перпендикулярного к оси струи положения по программе, заданной отклоняющей системой, в пределах нескольких градусов. Фотография интенсивности излучения, возбуждаемого узким электронным лучом в продольном или поперечном сечении, при соответствующей градуировке и учете краевых эффектов дает информацию о распределении излучателей в выделенной полосе. При перемещении струи в новые положения и повторениях измерительного процесса можно получить изображение продольного или поперечного среза струи в единицах интенсивности излучения или, при градуировке, распределения плотности в струе. Пример изображения сверхзвуковой струи, полученной описываемым методом, приведен на рис. 2. Фактически мы наблюдаем истечение в вакуум, поскольку отношение давлений составляет  $P_0/P_h = 3 \cdot 10^6$ . Угол разворота струи более  $90^\circ$ .



*Рис. 2. Составное изображение струи, «сшитое» из фотографий, полученных сканированием струи вдоль продольной оси. Минимальная ширина развертки луча 23 мм, шаг сканирования 22 мм.  $P_0 = 1200$  кПа,  $P_h = 0,4$  Па,  $T_0 = 295$  К. Электронный пучок:  $E_e = 10$  кэВ,  $I_e = 25$  мА. Сверхзвуковое сопло.*

Несмотря на достаточно грубую шшивку, по таким фотографиям можно определять соотношение интенсивностей свечения, по которому, в свою очередь, при соответствующей градуировке, соотношение плотностей в потоке. Пример такой оценки из приведенной фотографии представлен на графике (рис. 3) для ряда сечений  $x$ , нормированных на радиус выходного сечения сопла  $R_d$ .

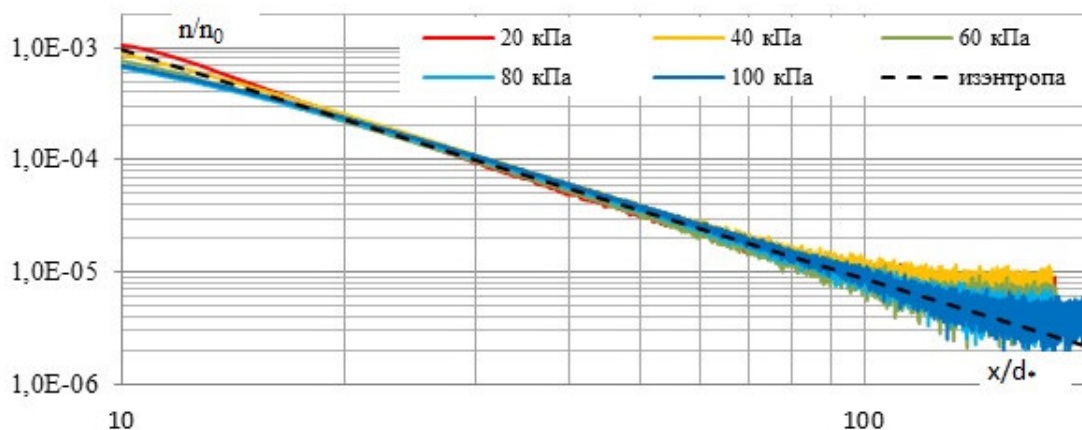


*Рис. 3. Профиль интенсивности свечения в зависимости от вертикальной координаты Z (к рис. 2).*

Несимметричность поперечного профиля обусловлена падением плотности тока электронного пучка вниз от оси струи (в «плюсовые» значения координаты  $Z$ ) вследствие рассеяния на молекулах струи и конусности электронной «метлы». Для градуировки по плотности можно выбрать значения интенсивности сигнала на близких расстояниях от сопла при отрицательных значениях  $Z$ , которые, по-видимому, соответствуют фоновым значениям плотности.

### 3.2. Спектроскопия

Другой, известный способ определения распределений плотности в поле истекающих струй состоит в использовании спектральных измерений интенсивности свечения на выбранной длине волны (для атомарных газов) или интегральной интенсивности колебательной полосы (для молекулярных газов). Обязательным условием, в реальности сильно ограничивающим выбор участка спектра, является отсутствие перекрытия другими полосами, либо другим газом в случае истечения смесей. Тем не менее, в ряде случаев такие измерения достаточно точны. Иллюстрацией может служить рис.4, на котором приведены отградуированные измерения продольных профилей плотности молекулярного азота при истечении из звукового сопла при разных значениях  $P_0$ .



*Рис. 4. Влияние давления  $P_0$  на распределение численной плотности азота на оси струи. Звуковое сопло  $d_* = 0,5$ мм. Спектральная полоса  $\lambda = 391$  нм.*

Приведенные зависимости от  $x/d_*$  численной плотности, нормированной на плотность в форкамере сопла,  $n/n_0$ , сравнены с изэнтропическим расчетом [11]. Незначительное отклонение от изэнтропы при расстояниях  $x/d_* < 20$ , т.е. на физическом расстоянии менее 10 мм от среза

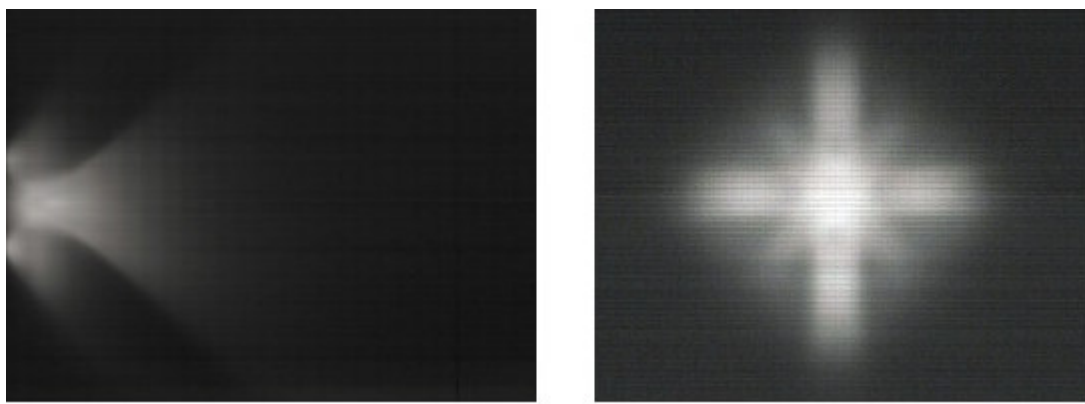
сопла, обусловлено электромагнитными наводками заземленной форкамеры сопла на электронный пучок, а также частичным столкновительным гашением флуоресценции при высоком уровне плотности. На расстояниях  $x/d_s > 100$  оказывает влияние проникновение фонового газа при приближении к диску Маха. В целом совпадение с изэнтропой очень хорошее, что подтверждает возможность измерений распределений плотности в струях методом электронно-пучковой спектроскопии на малогабаритных установках и с миниатюрными соплами.

### 3.3. Сканирование

Фоторегистрация продольных и поперечных сечений сверхзвуковых потоков начала использоваться при исследованиях газодинамики сверхзвуковых струй вскоре после применения высоковольтных хорошо сфокусированных пучков электронов для локальных измерений плотности разреженного газа [12]. Принцип работы этого метода заключался в перемещении газового объекта относительно неподвижного электронного пучка с одновременным согласованным перемещением фотопленки, на которую с помощью оптической системы фокусировалось излучение, возбужденное этим пучком. В дальнейшем с помощью денситометрии фотопленки исследователи получали искомые развёртки газовых струй. Эта техника особенно хорошо зарекомендовала себя при изучении полей плотности за многосопловыми компоновками газовых струй, истекающих в затопленное пространство [13].

Нами предложен и осуществлен переход на современную технику регистрации. В качестве детектора излучения использован ручной сканер изображения, представляющий собой линейку фотодатчиков длиной около 200 мм, обеспечивающую разрешение до 900x900 dpi. Считывание информации осуществляется в режиме on-line на микро-SD-карту. Таким образом, формируется файл с цифровыми данными, которые могут быть представлены как в виде изображения светящегося объекта, так и в виде графиков изменений плотности для выбранной координаты. Пример таких изображений при истечении рабочего газа через компоновку из четырех сверхзвуковых газовых источников представлен на рисунке 5.

Здесь приведены продольное (рис. 5,а) и поперечное сечения (рис. 5,б), потока. Снимки выполнены с серым светофильтром для устранения насыщения фотодатчиков сканера в областях с максимальной плотностью газа. Скорость сканирования 2 мм/с. Температура соплового блока  $T_0 = 300$  К. Давление в форкамере -  $P_0 = 100$  кПа. Давление окружающего фонового газа -  $P_h = 0,5$  Па. Энергия электронов  $E_e = 10$  кэВ, ток  $I_e = 30$  мА. Диаметр электронного пучка не превышал 1 мм. Преимуществом данного способа измерений является быстрое получение информации в цифровом виде, которое позволяет практически в режиме реального времени с высоким разрешением получать графики распределений плотности по интересующим линиям тока.



*Рис. 5. Сканированные изображения продольного (а) и поперечного (б) профилей составной струи, истекающей из квадратной сборки сопел.*



#### 4. Выводы.

В результате выполнения работы продемонстрированы на примерах возможности использования на малогабаритной экспериментальной установке Новосибирского государственного университета методов и средств диагностики сверхзвуковых потоков, истекающих из одиночных сопел и сопловых блоков в вакуум, сильно разреженное, а также затопленное пространство, которые могут быть использованы для разработки авиационно-космических систем нового поколения.

#### Благодарности

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Прикладная физика» НГУ при финансовой поддержке грантов Министерства образования и науки РФ 3.5918.2017/ИТР и 3.5920.2017/ИТР.

#### Литература

1. Герасимов Ю.И., Ярыгин В.Н. // Электронный журнал. 2012, т. 13 (1), с. 1-22. [www.chemphys.edu.ru/pdf/2012-07-13-001.pdf](http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2012-07-13-001.pdf).
2. Герасимов Ю.И., Ярыгин В.Н. // Электронный журнал. 2012, т. 13 (2), с. 1-26. [www.chemphys.edu.ru/pdf/2012-11-22-001.pdf](http://www.chemphys.edu.ru/pdf/2012-11-22-001.pdf)
3. Gerasimov Yu.I., Krylov A.N., Yarygin V.N. // XXV Internat.Symp. Rarefied Gas Dynamics (RGD25), St. Petersburg, 2006. Proc. 25th RGD, Novosibirsk. 2007. P. 610-615.
4. Герасимов Ю.И., Ярыгин В.Н., Крылов А.Н., Сагдуллин Б.А. // Теплофизика и Аэромеханика. 2009. Т. 16. №3. С. 395-404.
5. Бочкарев А.А., Великанов Е.Г., Ребров А.К., и др. // В сб. "Экспериментальные методы в динамике разреженных газов". Новосибирск. Изд-во ИТФ СО АН. 1974, с. 6-23.
6. <http://www.math.spbu.ru/GAM/gdl.html>
7. Зарвин А.Е., Каляда В.В., Яскин А.С. // Вакуумная наука и техника. Материалы XXIV науч.-техн. конф. Под ред. С.Б.Нестерова, 16–23.09.2017, г. Судак. М.: Новелла. 2017 - 352 с. С. 100-105.
8. Zarvin A.E., Kalyada V.V., Madirbaev V.Zh. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2017. V. 45. Issue 5. P. 819-827.
9. Schumacher B.W., Gadamer E O. // Can. J. Phys. 1958. V. 36(6). P. 659-671.
10. Зарвин А.Е., Яскин А.С., Каляда В.В. и др. // Вакуумная наука и техника. Материалы XXI науч.-тех. конф. Под ред. Д.В. Быкова. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ. 2014-382с. С. 33-36.
11. Жохов В.А., Хомутский А.А. // Труды ЦАГИ. Вып. 1224. М.: ЦАГИ, 1970. 224 с.
12. Кисляков Н.И., Ребров А.К., Шарафутдинов Р.Г. // ПМТФ. 1975. № 2. С. 42-52.
13. Ярыгин В.Н., Герасимов Ю.И., Крылов А.Н. и др. // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18. № 3. С. 345-372.