

МИНИСТЕРСТВО ОБЩЕГО И ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени академика С.П. КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНИЗАЦИОННОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ  
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ

*Методические указания к лабораторной работе № 1*

Составитель Н.Д. Семкин  
УДК 621.397.001.24

Исследование ионизационного преобразователя высокоскоростных частиц : Метод. указания к лаб. работе №1 / Самар. гос. аэрокосм. ун-т; Сост. Н.Д. Семкин. Самара, 1999, 16 с.

В методических указаниях к лабораторной работе №1 по дисциплине “Проектирование первичных преобразователей бортовой научной аппаратуры” приводятся краткие теоретические сведения, описание принципиальной схемы и экспериментальной установки, порядок выполнения лабораторной работы с перечнем контрольных вопросов.

Предназначены для студентов радиотехнического факультета.

Подготовлены на кафедре радиотехники.

Печатаются по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева

Рецензент : доц. В.М. Гречишников

**Цель работы:** ознакомиться с принципом действия, методикой испытаний и обработки информации с преобразователя.

### **Общие сведения**

В основе ионизационного метода при высокоскоростном ударе лежит явление образования и эмиссии заряженных частиц (ионов, электронов) вещества ударника и мишени. Механизм данного явления в различных диапазонах скоростей частиц различен, и в рамках одной модели описание его не представляется возможным. При скоростях частиц 1–6 км/с явление носит характер поверхностной ионизации. Эмиссия электронов, ионов происходит за счет нагрева материалов мишени и ча́стицы в рамках модели термоэлектронной эмиссии [1].

При скоростях соударения выше 15 км/с данное явление описывается по модели объемной ионизации [2], суть которой заключается в следующем: ударные волны, возникающие при соударении частицы с мишенью, настолько сжимают и нагревают вещество ударника и часть вещества мишени, что при разгрузке ударно-сжатое вещество превращается в плазму. При разлете в вакуум сгустка плазмы наблюдается эффект "закалки" степени ионизации [3]. Величина остаточного заряда, образованного "закаленными" ионами, содержит информацию о физико-химических параметрах измеряемых частиц.

Для выявления связи между параметрами пылевых частиц и параметрами разлетающегося сгустка ионизированного газа необходимо решение трех задач:

1. Определение состояния вещества во фронте ударной волны.
2. Расчет параметров сгустка плазмы, образовавшейся в результате изэнтропической разгрузки и ударно-сжатого вещества.
3. Расчет остаточной степени ионизации при разлете в вакуум сгустка плазмы.

В самом общем виде осуществление данной программы на всех ее этапах возможно лишь с привлечением численных методов. Для выявления возможности аппаратного метода большую ценность представляют упрощенные модели, позволяющие получить результат в аналитической форме.

Используя известные соотношения из теории ударных волн, а также уравнения состояния, можно получить аналитические выражения для заряда, импульса тока как функций параметров частицы и мишени, а также их некоторых констант в диапазонах скоростей  $0,5 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} < W < 50 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ , соответственно:

$$Q = \frac{A l - \frac{b + J - \varphi}{k T_{\Phi}} \cdot S t_0}{\sqrt{2 \pi m k T_{\Phi}}}; \quad (1)$$

$$Q_1 = \frac{R^{5/2} w^3}{1 + a^3} (G_{0y} + G_{IM} a^{11/12}), \quad (2)$$

где  $R, w$  - соответственно радиус, скорость частицы:

$$a = \sqrt{\frac{\rho_y}{\rho_M}};$$

$\rho_y, \rho_M$  - плотности частицы и мишени соответственно.

$$x \frac{t}{t_x}; \quad t_x = \frac{L(1+a)}{aw}, \quad (3)$$

где  $L$  - расстояние от мишени до приемника;

$t_x$  - время разлета плазмы;

$G_{ly}, G_{IM}$  - коэффициенты, учитывающие свойства частицы и мишени;

$u_{py} = \frac{w}{1+a}; u_{pM} = \frac{w}{1+a}$  - соответственно скорости разлета плазмы вещества ударника и мишени.

$J, \varphi$  - соответственно потенциал ионизации, работа выхода;

$S, t_0$  - площадь эмитирующей поверхности, время прохождения ударных волн через частицу;

$m$  - масса иона;

$T_{\Phi}$  - температура на фронте ударной волны;

$k$  - постоянная Больцмана.

Выражения (1) и (2) получены для плоских конструкций преобразователей. Одна из них представлена на рис. 1.

Ионизационный метод может быть реализован с помощью различных конструкций, отличающихся, как правило, между собой формой мишени и приемника, а также размерами. Конструктивное исполнение ионизационного преобразователя должно соответствовать минимальной зависимости измеряемых параметров от места соударения, максимальной чувствительности по массе, минимальным потерям и т. д. С помощью ионизационного преобразователя возможна регистрация субмикронных частиц.

Зависимости (1) и (2) получены в результате экспериментов с использованием электростатического ускорителя, особенностью которого является зарядка частицы в инжекторе. Учитывая такую особенность, зависимость эмитированного заряда от скорости, получаемая на электростатических ускорителях, в широком диапазоне скоростей от сотен метров в

секунду до десятков километров в секунду описывается одной зависимостью:

$$Q = c m^{\alpha} w^{\beta},$$

где  $\alpha \approx 1$ ,  $\beta \approx 3,2 \pm 0,2$ ,  $c$  – константа;  $c = (1 \div 3) 10^{-14}$ .

Разброс коэффициента  $c$  зависит от материалов мишени и частицы.

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка предназначена для изучения измерительных преобразователей пылевых частиц, основанных на различных физических явлениях, имеющих место при высокоскоростном ударе.

К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, изучившие правила эксплуатации экспериментальной установки и вакуумного оборудования. Правила эксплуатации вакуумной системы лабораторной установки приведены в приложении 1.

Выполнение лабораторной работы осуществляется только в присутствии и под руководством инженера или лаборанта, имеющего соответствующий опыт в обслуживании экспериментальной установки. Лабораторная установка включает вакуумную систему, исследуемый преобразователь (в данном случае ионизационный преобразователь), систему регистрации параметров пылевых частиц, систему регистрации параметров вакуумной системы, систему регистрации выходных сигналов с исследуемого преобразователя, устройство сопряжения преобразователя с ЭВМ, источник частиц (инжектор). Ионизационный преобразователь состоит из мишени 1 (рис.1), приемника ионов 2 типа ВЭУ-6, отражающего электрода 3, входной диафрагмы 4. Мишень выполнена из гаптала или другого тугоплавкого материала (вольфрама, ниобия, молибдена). Между входным электродом сеткой приемника ионов 2 и отражающим электродом 3 приложена разность потенциалов  $\sim 300 - 400$  В.

Источник частиц (инжектор) представляет собой устройство, состоящее из двух камер, расположенных одна в другой.

В пространстве между камерами располагается исходный порошок из частиц (это может быть алюминий, хром и т.д.). При подаче высоковольтного напряжения (2,0 КВ) в промежутке между камерами возникает напряженность электрического поля, за счет чего частицы, заряжаясь на игле, выбрасываются полем в пространство дрейфа со скоростями  $0,1 \div 2$  км  $s^{-1}$  в зависимости от их массы.

Система регистрации частиц состоит из двух цилиндров Фарадея, соответствующих усилителей 1 и 2 (рис.2), осциллографов запоминающих ("Осц. 1", "Осц. 2"). Ускоренные с помощью инжектора частицы пролетают через цилиндры Фарадея (индукционные преобразователи), при этом в последних наводятся соответствующие положительные заряды, так как частицы заряжаются в инжекторе положительно.

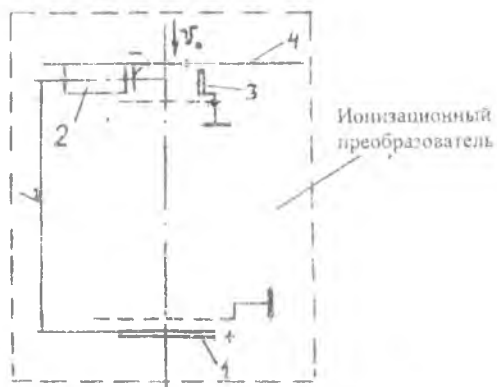


Рис.1. Ионизационный преобразователь

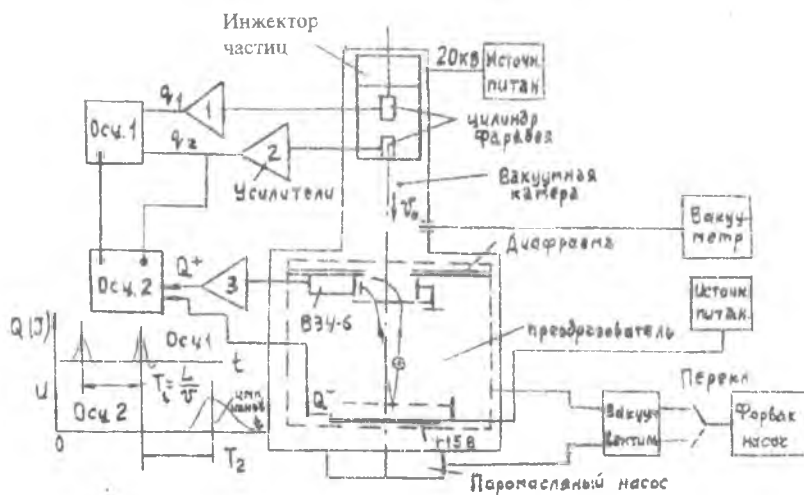


Рис.2. Система регистрации частиц

## Вопросы для допуска к лабораторной работе

1. Принцип работы ионизационного преобразователя?
2. Какие параметры измеряются, а какие находятся путем обработки результатов эксперимента?
3. Как связаны измеряемые параметры с параметрами частицы?
4. Какая степень разрежения в камере необходима?
5. Как определяются погрешности измерения параметров частицы?

### Задания:

1. Ознакомиться с принципом действия, режимами работы и параметрами ионизационного преобразователя.
2. Изучить лабораторную установку и методику проведения экспериментов.
3. Исследовать экспериментальные зависимости заряда  $Q^+ = f(m, w)$ , времени разлета плазмы  $\tau'_{\text{разл}} = f(w)$ .
4. Освоить методику обработки результатов экспериментов, определения погрешностей измерения параметров частицы.
5. Сравнить результаты экспериментов с теоретическими зависимостями (1) и (2).

### Методика проведения экспериментов

1. Исследование экспериментальных зависимостей заряда

$Q^+ = f(w)$  и времени разлета плазмы  $\tau'_{\text{разл}} = f(w)$ ,

где  $m$ ,  $w$  - масса и скорость частицы;

$Q^+$  - заряд ионов, образованных в результате соударения частицы с мишенью.

Заряды  $q_1$  и  $q_2$  в цилиндрах Фарадея (рис. 2) измеряются с помощью осциллографа 1 и определяется по формуле

$$Q_1 = \frac{u_{\Phi} c_{\Phi}}{k_y} \quad (4)$$

где  $u_{\Phi}$ ,  $c_{\Phi}$  - соответственно амплитуда импульсного напряжения с цилиндра Фарадея и его емкость;

$k_y$  - коэффициент усиления усилителей 1 и 2.

Кроме того, заряд, образованный на мишени в результате соударения с ней частицы, определяется с помощью осциллографа.

2. Скорость частицы определяется как  $W = \frac{l}{\tau}$  где  $l$ ,  $\tau$  - соответственно длина цилиндра Фарадея и время пролета частицы через него. Ско-

рость частицы также определяется путем измерения времени пролета расстояния между цилиндром Фарадея и мишенью.

При соударении частицы с мишенью образуется ионный импульс, параметры которого (время нарастания переднего фронта и заряд) являются функцией скорости и массы, то есть описывается выражениями (1), (2) и (3). Время нарастания переднего фронта ионного импульса есть время от начала процесса (удара) до максимума ионного импульса и описывается формулой (3).

Таким образом, измеряется скорость частицы, затем скорость ее определяют по измеренному времени нарастания переднего фронта ионного импульса, образованного в результате высокоскоростного соударения.

По результатам измерений строятся графики экспериментальных зависимостей  $Q^+ = f(m, W)$ ,  $t_x = f(W)$

Затем данные эксперимента в результате их аппроксимации представляются в виде соответствующих выражений, которые сравниваются по точности с формулами (1) или (2) и (3), масса частицы рассчитывается по формуле:

$$m_r = \frac{2 \cdot u_{\text{уск}} \cdot Q_r}{W_r^2 \cdot e \cdot 6.24 \cdot 10^{18}} \quad (5)$$

где  $e$  - заряд электрона;  $u_{\text{уск}}$  - ускоряющее напряжение на инжекторе.

Заряд, регистрируемый с помощью ВЭУ-6 и приведенный к его входу, равен:

$$Q_k = \frac{\int_0^{\tau_m} i_m dt}{K_{\text{ВЭУ}}}, \quad (6)$$

где  $i_m$  - ток на выходе ВЭУ;

$K_{\text{ВЭУ}}$  - коэффициент усиления ВЭУ-6;

$\tau_m$  - длительность импульса по уровню 0,1.

Заряд, приведенный к начальному (заряд, образованный в результате возникновения облака плазмы у поверхности мишени после ударного взаимодействия), равен:

$$Q_0 = \frac{2 \cdot Q_k \cdot L^2}{r_{\text{ВЭУ}}^2}, \quad (7)$$

где  $L$  и  $r_{\text{ВЭУ}}$  - соответственно расстояние от мишени до ВЭУ-6 и радиус его входного отверстия.

Наиболее вероятная скорость разлета плазмы определялась как

$$W = \frac{L}{\tau_m},$$



где  $t_m^*$  – время разлета плазмы от момента соударения до максимума ионного тока ВЭУ-6.

### Порядок выполнения работы

#### 1. Подготовка экспериментальной установки к работе.

Подготовка экспериментальной установки к работе проводится в соответствии с приложением 1 и рис. III. Готовность установки к работе определяется показаниями измерителя степени разрежения (рис. III). Давление в камере должно быть не хуже  $10^{-4}$  мм рт.ст.

#### 2. Проверка работоспособности инжектора частиц.

Включить источник питания инжектора ( $U=20$  кВ). Зарядочувствительные усилители 1 и 2 (рис. 2) подключить ко входам запоминающего осциллографа "Осц. 1", режим работы осциллографа - ждущий.

Закрепить наличие частиц через цилиндры Фарадея, от каждой частицы наводится положительный импульс.

#### 3. Регистрация скорости частиц.

Скорость частиц находится путем измерения времени полета их через два цилиндра, или времени пролета расстояния между нижним цилиндром и мишенью. При этом от положительного импульса заряда, наведенного частицей в нижнем цилиндре, запускается осциллограф "Осц. 2", второй импульс электронов с мишени (отрицательный) поступает также на вход "Осц. 2". Измеренное время соответствует скорости частицы.

4. Измерение заряда, образуемого ударом частицы, как функции скорости.

Устанавливать осциллограф "Осц. 2" в ждущий режим. При пролете частицы положительный импульс с выхода усилителя 2 запускает осциллограф "Осц. 2". Далее частица соударяется с мишенью, при этом отрицательный импульс с нее фиксирует начало процесса разлета плазмы. Через время  $t_x$  на выходе ВЭУ-6 образуется положительный импульс ионов, который усиливается усилителем 3 и запоминается с помощью "Осц. 2".

Таким образом, необходимо зарегистрировать несколько десятков таких процессов с целью построения зависимости  $Q^+ = f(W)$  при известной массе частиц, а также  $t_x = f(W)$ , где  $t_x$  - время нарастания переднего фронта ионного импульса (время разлета плазмы).

## Обработка результатов измерения

1. Построить характеристики  $Q^+ = f(W)$  и  $t_s = f(W)$

Характеристику  $Q^+ = f(W)$  построить в логарифмическом масштабе.

2. Найти среднее арифметическое результатов наблюдений, то есть каждая точка на зависимости  $Q^+ = f(W)$  находится путем обработки  $n$  измерений

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

3. Найти среднеквадратическое отклонение результатов наблюдений

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{A})^2}{n-1}}$$

где  $x_i$  -  $i$ -ый результат наблюдения,

$\bar{A}$  - среднее арифметическое результатов наблюдений,

$n$  - число результатов наблюдений,

$S_x$  - оценка среднеквадратического отклонения результатов наблюдений.

4. Сравнить результаты экспериментов с теоретическими зависимостями (1), (2) и (3) и оценить погрешности этих формул. Указать основные составляющие погрешностей экспериментов.

## Содержание отчета

1. Наименование работы.
2. Цель работы.
3. Схема экспериментальной установки.
4. Результаты измерений, расчеты, графики, осциллограммы, погрешности измерений.
5. Выводы: сравнительный анализ полученных результатов с теоретическими положениями.

## Контрольные вопросы

1. Объяснить принципы работы ионизационного преобразователя.
2. Объяснить методику проведения экспериментов.
3. Какие механизмы образования ионов при высокоскоростном ударе?
4. Как можно определить скорость частицы по измеренному ионному импульсу?
5. Почему в качестве приемника используется вторично-электронный умножитель?

6. Чем объясняется использование зависимости  $Q \sim \sigma^{\alpha} \omega^{\beta}$  в широком динамическом диапазоне скоростей?
7. Каким образом уменьшается зависимость измеряемых параметров от места соударения в ионизационном преобразователе.

### Литература

1. Семкин Н. Д. Исследование характеристик пылевых частиц с помощью электростатического ускорителя. ВИННИГИ 1 6709-B87, Куйбышев, 1986, 41с.
2. Семкин Н. Д., Юсупов Г. Я., Гришин В. К. Расчет ионного спектра, образованного ударной плазмой во времяпролетном масс-спектрометре // Методы обработки и отображения информации в радиотехнических устройствах : Сб. научн. трудов, Куйбышев, 1985.
3. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Правила эксплуатации вакуумного оборудования экспериментальной установки.

Состав вакуумного оборудования. В состав вакуумной установки (Рис.1П) входит:

1. Вакуумная камера.
2. Форвакуумный насос.
3. Паромасляный насос.
4. Клапан вакуумной камеры.
5. Клапан для откачки воздуха из паромасляного насоса.
6. Клапан паромасляного насоса.
7. Пусковые кнопки для обеспечения перемещения вакуумной камеры вверх и вниз.
8. Датчики давления (термопары и ионизационная лампы).
9. Измеритель давления в камере и системе откачки.
10. Нагреватель паромасляного насоса.

Порядок эксплуатации вакуумной системы.

1. Включить форвакуумный насос. При этом через несколько минут клапан для откачки воздуха из паромасляного насоса необходимо открыть (повернуть на 90 град. против часовой стрелки и потянуть до упора на себя). В этом случае производится откачка из паромасляного насоса.

2. Через несколько минут включить питание измерителя давления (касается только его термомпарного датчика). (Включение ионизационного датчика на этом этапе не допускается).

3. Включить питание нагревателя паромасляного насоса. Клапан паромасляного насоса должен находиться в положении рукояткой вниз, что соответствует изоляции вакуумной камеры от паромасляного насоса.

Примечание: категорически не допускается одновременно открывать клапаны вакуумной камеры и паромасляного насоса.

4. Произвести откачку воздуха из вакуумной камеры. Для этого необходимо закрыть клапан паромасляного насоса 1 и открыть клапан вакуумной камеры.

5. При достижении в вакуумной камере давления  $\sim 10^{-1}$  мм рт.ст. и разогреве паромасляного насоса (время разогрева  $\sim 45$  минут) закрыть клапан вакуумной камеры и открыть клапан откачки из паромасляного насоса 1, после чего открыть клапан паромасляного насоса 2 (ручку клапана поднять вверх). При этом дальнейшая откачка из вакуумной камеры производится с помощью паромасляного насоса.

6. При достижении степени вакуума менее  $10^{-3}$  мм рт.ст. наблюдать по стрелке вакуумметра (она должна зашкалить), включить нагреватель ионизационного датчика и через 10 минут переключить на режим измерения. Экспериментальная установка готова к работе при остаточном давлении

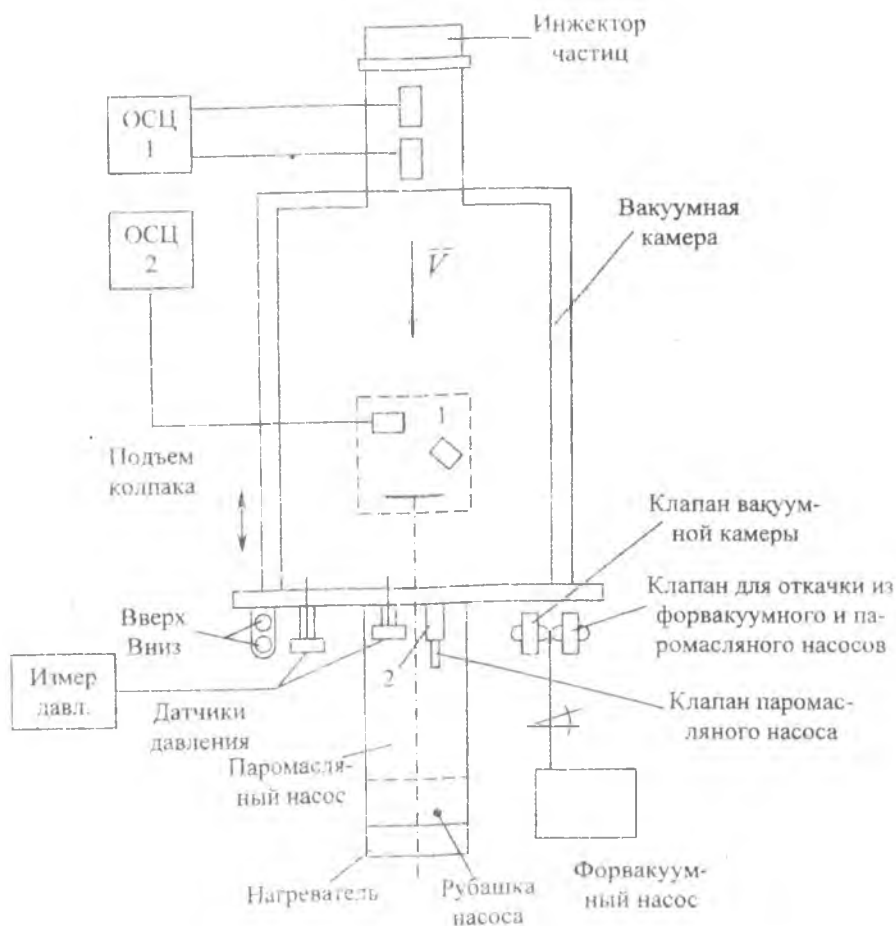


Рис. III

нии в камере  $\sim 5 \cdot 10^{-5}$  мм рт.ст. После этого допускается включение инжектора частиц.

Порядок выключения вакуумной установки.

1. Проверить выключение инжектора частиц.
2. Выключить измеритель вакуума.
3. Закрыть клапан 2 поворотом ручки вниз.
4. Выключить нагреватель паромасляного насоса.
5. Проверить температуру рубашки паромасляного насоса - она должна быть не более  $50^{\circ}\text{C}$ .
6. Закрыть клапан 1.
7. Выключить форвакуумный насос.
8. Впустить воздух в систему форвакуумного насоса нажатием кнопки или зажать вакуумный шланг форвакуумного насоса.

Составитель Семкин Николай Данилович

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНИЗАЦИОННОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ  
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ

Методические указания  
к лабораторной работе №1

Редактор	Н.С. Куприянова
Техн. редактор	Г.А. Усачева
Корректор	Т.И. Щелокова

Подписано в печать 30.05.99 г. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Бумага газетная. Печать офсетная.

Усл.п.л. 0,93. Усл. кр.-отт. 1,05. Уч.-изд.л. 1,00. Тираж 50 экз.

Заказ 78.

Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П.Королева,  
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

ИПО Самарского государственного  
аэрокосмического университета  
443001 Самара, Молодогвардейская, 151.