

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

**ИССЛЕДОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ КРУГОВОГО ШПАНГОУТА**

САМАРА 2012

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

ИССЛЕДОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ КРУГОВОГО ШПАНГОУТА

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве методических указаний к лабораторной работе*

САМАРА
Издательство СГАУ
2012

УДК 539.3(075)
ББК 30.121

Составители: *И. С. Ахмедьянов, В. А. Мехеда, О. В. Хвесьюк*

Рецензент канд. техн. наук, доц. В. К. Ш а д р и н

Исследование напряженно-деформированного состояния кругового шпангоута: метод. указания / сост. *И.С. Ахмедьянов, В.А. Мехеда, О.В. Хвесьюк*. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 16 с.: ил. 11; табл. 1

Дано описание учебной лабораторной установки для исследования напряженного состояния кругового шпангоута. Обосновывается выбор расчетной схемы. Приводятся формулы для проведения теоретических расчетов, методика измерения деформаций, порядок выполнения работы и оформления ее результатов, контрольные вопросы.

Предназначено для студентов 1 и 3 факультетов дневного и вечернего отделений.

УДК 539.3(075)
ББК 30.121

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Описание объекта исследования.....	4
2 Теоретическое решение	5
3 Экспериментальное определение деформаций и напряжений.....	7
3.1 Определение деформации в точке конструкции	7
3.2 Измерение отдельных составляющих деформации.....	8
4 Порядок выполнения работы.....	10
5 Контрольные вопросы.....	14
Список использованной литературы	15

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРУГОВОГО ШПАНГОУТА

Цель работы – экспериментальная проверка приемлемости расчетной схемы в виде плоской рамы для описания напряженно-деформированного состояния кругового шпангоута.

1 ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальная установка представляет собой плоский круговой шпангоут (рис. 1 и 2), изготовленный из алюминиевого сплава АМГ-6. Он состоит из двух колец 1 и 2, которые соединены между собой болтами 3.



Рис. 1 – Общий вид установки

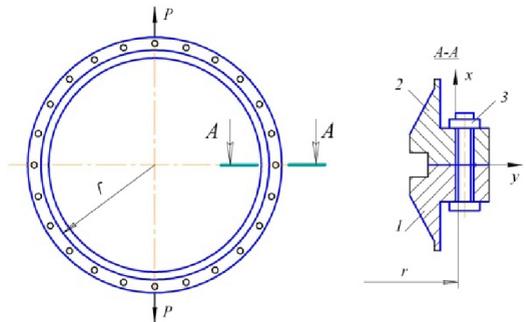


Рис. 2 – Схема экспериментальной установки

Площадь поперечного сечения шпангоута $F=17,8 \text{ см}^2$, момент инерции сечения относительно главной центральной оси X $J=22,92 \text{ см}^4$, радиус осевой линии шпангоута, проходящей через центры тяжести поперечных неослабленных сечений $r=34 \text{ см}$.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Шпангоут можно рассматривать как замкнутую плоскую раму, которая является трижды статически неопределимой системой [1, 2, 3]. Раскрытие статической неопределимости осуществим с помощью метода сил. Условия симметрии позволяют сократить число неизвестных до одного.

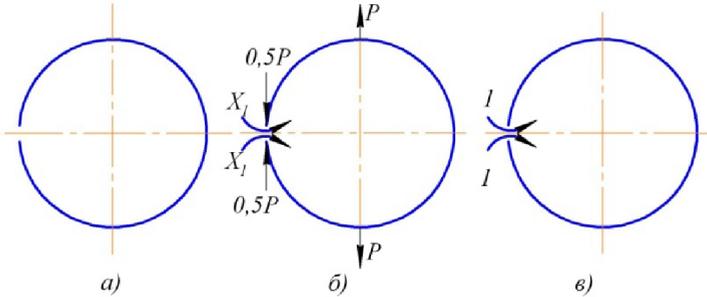


Рис. 3 –Основная, эквивалентная и единичная системы

Основную систему выберем, разрезав шпангоут, как показано на рис. 3, а. В силу симметрии системы относительно горизонтальной оси в месте размыкания перерезывающая сила как обратно симметричный фактор будет равна нулю [3].

В месте разреза осевая сила будет равна $0,5P$, так как система симметрична относительно вертикальной оси. Тогда остается один неизвестный фактор в сечении - изгибающий момент, величину которого обозначим через X_1 (см. рис. 3, б).

Значение X_1 определяется из канонического уравнения:

$$\Delta_{10} + \delta_{11} X_1 = 0. \quad (1)$$

Для вычисления коэффициентов Δ_{10} и δ_{11} необходимо найти изгибающие моменты M_o и \bar{M}_1 в основной системе от внешней нагрузки (рис. 4) и от единичного момента (рис. 3, в). Соответствующие эпюры приведены на рис. 5.

Аналитическое выражение для M_o на участке $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$ имеет вид:

$$M_o(\varphi) = 0,5Pr(1 - \cos \varphi). \quad (2)$$

Поскольку эпюры изгибающих моментов M_0 и \bar{M}_1 симметричны относительно горизонтальной и вертикальной осей, достаточно определить их закон изменения для одной четвертинки шпангоута в пределах угла $0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$. Изгибающий момент, увеличивающий кривизну шпангоута, считается положительным.

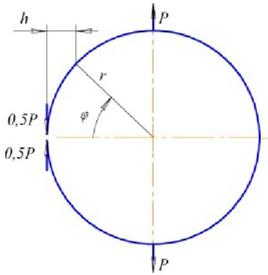


Рис. 4 – Схема нагружения основной системы внешней нагрузкой

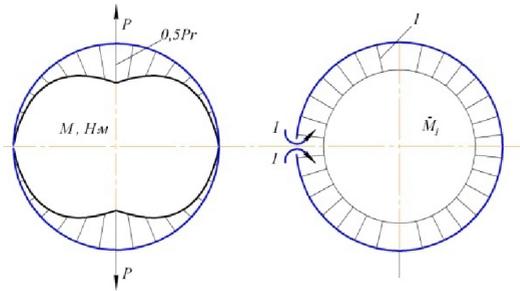


Рис. 5 – Эпюры изгибающих моментов

Определим коэффициенты канонического уравнения. Интегрирование производим от 0 до $\pi/2$, учетверяя результат

$$\Delta_{10} = 4 \int_0^{\pi/2} \frac{M_0 M_1}{EJ} r d\varphi = -\frac{2Pr^2}{EJ} \int_0^{\pi/2} (1 - \cos \varphi) d\varphi = \frac{2Pr^2}{EJ} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right),$$

$$\delta_{11} = 4 \int_0^{\pi/2} \frac{M_1^2}{EJ} r d\varphi = \frac{4r}{EJ} \int_0^{\pi/2} d\varphi = \frac{2\pi r}{EJ}.$$

Здесь E и J – модуль упругости материала и момент инерции поперечного сечения шпангоута.

Далее находим:

$$X_1 = -\frac{\Delta_{10}}{\delta_{11}} = Pr \left(\frac{1}{\pi} - \frac{1}{2} \right). \quad (3)$$

Статическая неопределимость раскрыта. Окончательные значения изгибающего момента M и осевой силы N в сечениях шпангоута рассчитываются по формулам:

$$M(\varphi) = M_0(\varphi) + M_1 X_1, \quad (4)$$

$$N(\varphi) = N_0(\varphi). \quad (5)$$

Осевое усилие N_0 в основной системе от внешней нагрузки как функцию угла φ предлагается студентам найти самостоятельно, используя схему рис 4.

Изгибающий момент M и осевая сила N вызывают нормальные напряжения в сечениях шпангоута:

$$\sigma = \frac{N}{F} + \frac{M}{I} y. \quad (6)$$

Здесь F -площадь поперечного сечения шпангоута,
 y - расстояние от главной оси сечения x до точки, в которой определяется напряжение.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ

3.1 Определение деформации в точке конструкции

В этом случае тензорезистор R_a (активный датчик) наклеивается на поверхность конструкции в исследуемой точке и ориентируется в заданном направлении. Далее он включается в плечо измерительного моста (рис.6), а в другое, смежное плечо для уравнивания моста и компенсации температурной деформации включается компенсационный датчик R_k .

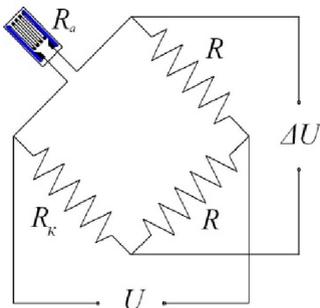


Рис.6 – Измерительный мост

Измерительный мост является входной цепочкой тензометрической измерительной системы. Измерительная система запитывает мост напряжением U по одной диагонали, а с другой диагонали снимает сигнал разбаланса моста ΔU , вызванный деформированием тензорезистора R_a .

Допустим, деформация вызвана приращением нагрузки на конструкцию

$$\Delta P = P_k - P_o .$$

Здесь P_o - начальное, а P_k - конечное значение нагрузки.

Приращению нагрузки ΔP будет соответствовать приращение показаний прибора по конкретному датчику

$$R_a: \Delta n = n_k - n_o,$$

где n_o - показание измерительного прибора при действии начальной нагрузки, а n_k - конечной.

В учебной лаборатории прочности используется измерительная система СИИТ-3 (Система Информационная Измерительная Тензометрическая) на 100 каналов. В этой системе переход от приращения показаний Δn к деформациям производится по формуле

$$\varepsilon = \frac{4}{K} 10^{-6} \Delta n. \quad (7)$$

Здесь K – коэффициент тензочувствительности используемых тензорезисторов. Датчики на шпангоуте имеют $K=2,04$.

3.2 Измерение отдельных составляющих деформации

Пусть стержневой элемент одновременно подвергается растяжению и изгибу (рис.7). Продольная деформация в точке будет состоять из двух компонент $\varepsilon = \varepsilon_N + \varepsilon_M$. Здесь ε_N деформация в точке от действия растяжения, а ε_M - от изгиба.

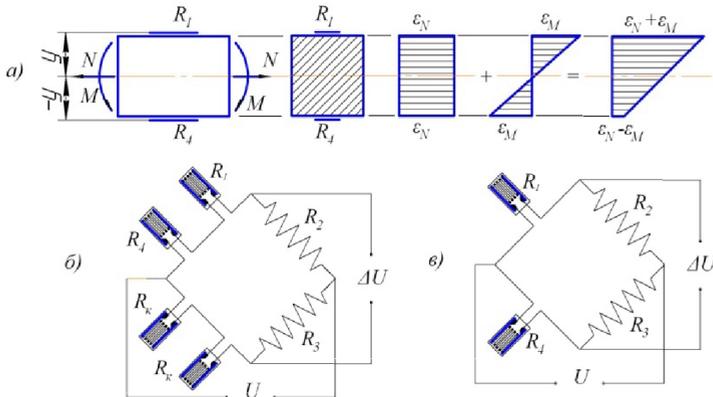


Рис. 7 – Схемы раздельного измерения деформаций:
 а – схема нагружения объекта и установки датчиков;
 б – измерение деформации растяжения-сжатия;
 в – измерение деформации изгиба

Если тензорезисторы R_1 и R_4 наклеить на равном расстоянии от оси изгиба (рис. 7, а), то деформации изгиба, действующие на датчики, будут равны по величине и противоположны по знаку.

Полные продольные деформации в местах наклейки тензорезисторов R_1 и R_4 будут соответственно

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_N + \varepsilon_M,$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_N - \varepsilon_M.$$

Решая эти уравнения совместно, получим:

$$\varepsilon_N = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_4}{2}, \quad \varepsilon_M = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_4}{2}.$$

Суммирование и вычитание сигналов датчиков можно осуществить аппаратно в пределах измерительного моста [4].

Для измерения ε_N необходимо тензорезисторы R_1 и R_4 включить последовательно в одно плечо измерительного моста (рис. 7, б) и удвоить число компенсационных датчиков в смежном плече. По показанию такого моста осевая деформация подсчитывается по формуле (7).

Если тензорезисторы R_1 и R_4 включить в смежные плечи моста (рис. 7, в), то будет измеряться деформация изгиба ε_M , причем чувствительность моста к изгибным деформациям удвоится, а цена деления прибора уменьшается в два раза:

$$\varepsilon = \frac{2}{K} 10^{-6} \Delta l. \quad (8)$$

Деформации шпангоута измеряются тензорезисторами в восемнадцати точках, как это показано на рис. 8. Номера датчиков обозначены цифрами. Одна половина датчиков располагается на внутренней поверхности шпангоута, а другая - на наружной. Значения углов φ , определяющих положение датчиков, приведены в таблице 1.

Каждый датчик деформации состоит из двух тензорезисторов, которые наклеиваются на равном расстоянии y от оси симметрии сечения (рис. 8), соединяются последовательно и подключаются к измерительному мосту по схеме рис. 7,б. Таким образом, исключаются деформации от изгиба шпангоута из своей плоскости, не предусмотренные условиями испытания.

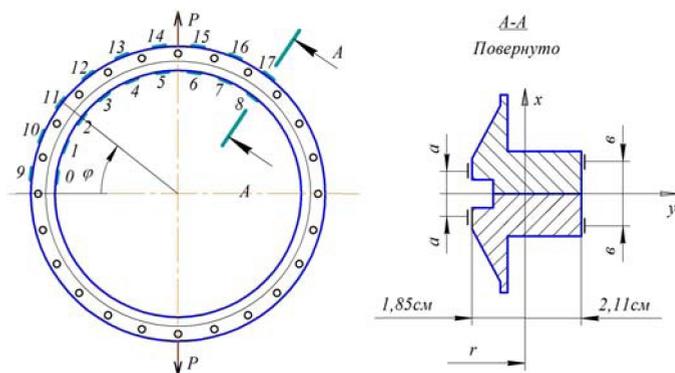


Рис. 8 – Схема наклейки тензорезисторов

Таблица 1 – Угловое положение датчиков

Номер датчика	0, 9	1, 10	2, 11	3, 12	4, 13	5, 14	6, 15	7, 16	8, 17
Угол φ, градусы	7,5	22,5	37,5	52,5	67,5	82,5	97,5	112,5	127,5

Экспериментальные напряжения в исследуемых точках находятся по закону Гука для одноосного напряженного состояния $\sigma = E\varepsilon$. Модуль упругости сплава АМГ-6 равен $E=7 \cdot 10^4 \text{ МПа}$

4 Порядок выполнения работы

4.1 По формуле (3) подсчитать X_i .

4.2 Построить эпюры $M(\varphi)$ изгибающих моментов и $N(\varphi)$ осевых сил. При выполнении расчётов воспользоваться данными таблицы 1 (рис. 9), для построения эпюр выполнить все необходимые вычисления в *Excel* с заполнением столбцов 5-7 таблицы 2 (рис. 10).

4.3 По формуле (6) подсчитать значения нормальных напряжений в наружных и внутренних волокнах поперечного сечения шпангоута и построить соответствующие эпюры. Для построения эпюр выполнить все необходимые вычисления в *Excel* с заполнением столбцов 8-9 таблицы 2 (рис. 10).

4.4 Подсоединить кабель от переключателя датчиков прибора СИИТ-3 к штепсельным разъёмам лабораторной установки и по маркировке разъёмов установить соответствие между номерами датчиков и номерами каналов прибора СИИТ-3.

4.5 С помощью прибора СИИТ-3 снять показания датчиков при предварительной P_0 и окончательной P_k нагрузках.

4.6 Вычислить приращения показаний датчиков Δn , вызванные нагрузкой $P = P_k - P_0$.

4.7 Эксперимент повторить ещё два раза, поместить результаты в столбцы 2-10 таблицы 3 (рис. 11) и результаты трёх опытов усреднить, поместив найденное значение Δn_{cp} в столбец 11.

4.8 По средним показаниям датчиков подсчитать напряжения в исследуемых точках конструкции, поместив полученные результаты в столбец 12 таблицы 3.

№	Исходные данные	Значение
1	Площадь поперечного сечения F , мм ²	1780
2	Главный центральный момент инерции I_x , мм ⁴	229200
3	Модуль упругости материала шпангоута E , МПа	70000
4	Радиус осевой шпангоута r , мм	340
5	Коэффициент тензочувствительности K	2,04
6	Расчётное значение нагрузки P^0 , Н	4000
7	Расстояние от нейтральной оси до крайней внутренней точки сечения y_1 , мм	-18,5
8	Расстояние от нейтральной оси до крайней внутренней точки сечения y_2 , мм	21,1
9		
10		
11		

Рис. 9 – Таблица 1. Исходные данные

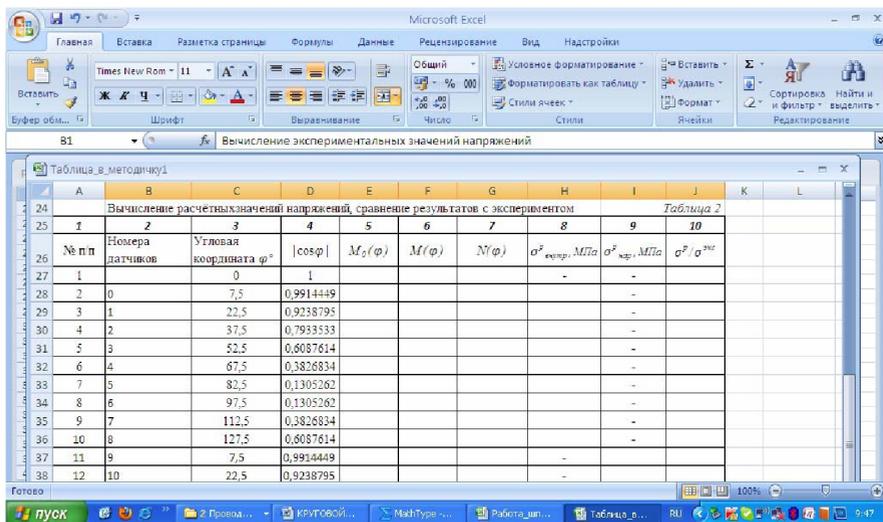


Рис. 10 – Таблица 2. Расчет теоретических напряжений

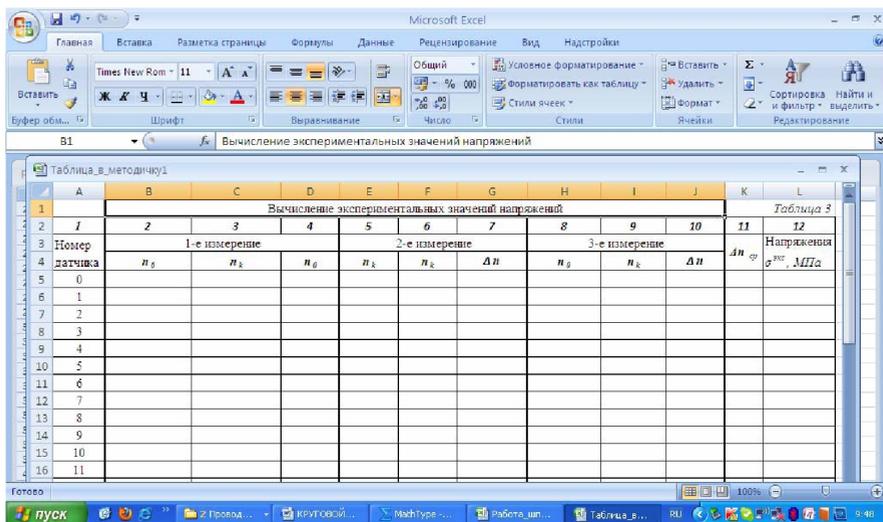


Рис. 11 – Таблица 3. Обработка результатов эксперимента

4.9 Оценить расхождение между расчётными и экспериментальными значениями напряжений в исследуемых точках конструкции, поместив результаты расчёта в столбец 10 таблицы 2 (рис. 10).

4.10 Оценить приемлемость выбранной расчётной схемы для описания напряжённо-деформированного состояния шпангоута.

5 Контрольные вопросы

1. Какова степень статической неопределенности шпангоута, если рассматривать его как плоскую раму с замкнутым контуром?
2. Какие рациональные варианты выбора основной системы возможны для рассматриваемого шпангоута.
3. Какие внутренние силовые факторы в сечениях шпангоута являются симметричными относительно линии действия сил P ?
4. В чем смысл принципа независимости действия сил и при каких уровнях нагрузок он справедлив?
5. Повлияет ли на результаты эксперимента увеличение предварительной и окончательной нагрузок на 500 H ?
6. Как определяются экспериментальные значения нормальных напряжений в исследуемых точках шпангоута?
7. Каким образом исключаются из результатов эксперимента деформации, вызванные изгибом шпангоута из его плоскости?
8. Как проверить правильность построения окончательной эпюры M для шпангоута?
9. В чем сущность метода сил?

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахмедьянов, И.С.* Расчет шпангоутов [Текст]: учеб. пособие / *И.С. Ахмедьянов.* - Куйбышев: КуАИ, 1988. - 76 с.
2. *Бояришинов, С.В.* Основы строительной механики машин [Текст]: учебник / *С.В. Бояришинов.* – М.: Машиностроение. – 1973. - 456 с.
3. *Феодосьев, В.И.* Сопротивление материалов [Текст]: учебник / *В.И. Феодосьев.*- М.: Наука, 1970. – 544 с.
4. *Мехеда, В.А.* Тензометрический метод измерения деформаций [Текст]: учеб. пособие / *В.А. Мехеда.* – Самара: СГАУ, 2011. – 54 с.

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
КРУГОВОГО ШПАНГОУТА**

Методические указания к лабораторной работе

Составители: *Ахмедьянов Исхак Саидович,
Мехеда Виллий Андреевич,
Хвесьюк Олег Вячеславович*

Редактор И.И.Спиридонова
Доверстка И.И.Спиридонова

Подписано в печать 16.05.2012 . Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ . Арт. – М3 /2012

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.