

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

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ  
ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА ПРИ  
ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ И ПОСТОЯННОМ  
ОБЪЕМЕ (ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ)  
МЕТОДОМ КЛЕМАНА – ДЕЗОРМА**

**САМАРА 2012**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ  
ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА  
ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ  
И ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ  
(ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ)  
МЕТОДОМ КЛЕМАНА – ДЕЗОРМА

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета  
в качестве методических указаний к лабораторной работе № 1-27*

САМАРА  
Издательство СГАУ  
2012

УДК 53(075)  
ББК 22.313

Составители: *Н.М.Рогачев, С.И. Гусева*

Рецензент В.В. Б и р ю к, доктор технических наук, профессор

**Определение отношения теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме (показателя адиабаты) методом Клемана – Дезорма:** метод. указания к лаб. работе №1-27/ *Сост.: Н.М. Рогачев, С.И. Гусева.* – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2012. – 16 с.

Содержат методические и инструктивные материалы, необходимые для выполнения работ по исследованию адиабатического процесса.

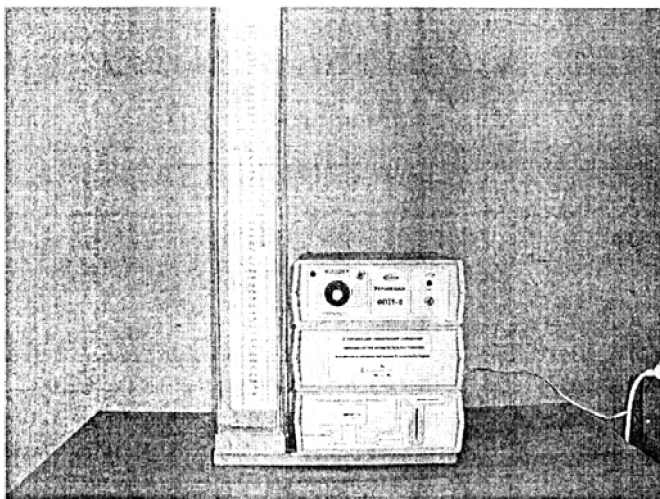
Приводится схема и описание экспериментальной установки, порядок выполнения работы и обработки опытных данных, контрольные вопросы и перечень рекомендуемой литературы.

УДК 53(075)  
ББК 22.313

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2012

*Лабораторная работа № 1-27.*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ  
ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ  
И ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ (ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ)  
МЕТОДОМ КЛЕМАНА – ДЕЗОРМА**



*Цель работы:* измерение отношения теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме.

*Приборы и принадлежности:* лабораторная установка ФПТ 1 – 6.

# 1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

## 1.1. Теплоемкость газов

Состояние газов характеризуется параметрами состояния: давлением  $p$ , объемом  $V$  и температурой  $T$ . Уравнение, связывающие эти величины, называется уравнением состояния вещества. Идеальный газ подчиняется уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \nu RT, \quad (1)$$

где  $\nu$  – число молей,  $R$  – универсальная газовая постоянная.

Если  $\nu = 1$  моль, то уравнение (1) примет вид:

$$pV = RT.$$

Величина теплоемкости газов зависит от условий нагревания. Воспользуемся уравнением состояния (1) и первым началом термодинамики:

$$d'Q = dU + d'A, \quad (2)$$

которое гласит: количество теплоты  $d'Q$  переданное системе, расходуется на увеличение ее внутренней энергии  $dU$  и на работу  $d'A$ , совершаемую системой против внешних сил.

По определению теплоемкость

$$C = d'Q / dT = dU/dT + d'A / dT. \quad (3)$$

Из уравнения (3) видно, что теплоемкость  $C$  может иметь различные значения в зависимости от способов нагревания газа. Элементарная работа

$$d'A = pdV. \quad (4)$$

Количество теплоты, необходимое для нагревания одного моля газа на 1К, называется молярной теплоемкостью.

## 1.2. Изохорический процесс

Процесс называется изохорическим, если объем газа при изменении температуры остается постоянным; т.е.  $V = const$ . В этом процессе  $dV = 0$ , следовательно, и  $d'A = 0$ . Таким образом, в изохорическом процессе вся теплота, подведенная к газу, идет на увеличение ее внутренней энергии. Тогда из уравнения (3) следует, что молярная теплоемкость при постоянном объеме

$$C_v = dU/dT. \quad (5)$$

## 1.3. Изобарический процесс

Процесс, протекающий при постоянном давлении ( $p = const$ ), называется изобарическим. Молярная теплоемкость при постоянном давлении

$$C_p = dU/dT + pdV/dT. \quad (6)$$

Возьмем дифференциал от обеих частей уравнения состояния (1), записанного для одного моля газа:

$$pdV + Vdp = R dT. \quad (7)$$

Поскольку в изобарическом процессе  $p = const$ , то  $dp = 0$ .

Следовательно,

$$p dV = R dT. \quad (8)$$

Подставляя выражение (8) в (6) и учитывая, что  $dU /dT = C_v$ , получим уравнение Р. Майера:

$$C_p - C_v = R. \quad (9)$$

## 1.4. Изотермический процесс

Изотермическим называется процесс, протекающий при постоянной температуре ( $T = const$ ). В этом процессе  $dT = 0$  и  $d'Q = d'A$ , т.е. внутренняя энергия газа остается постоянной, а все тепло, подведенное к системе, расходуется на работу.

## 1.5. Адиабатический процесс

Процесс, протекающий без теплообмена с внешней средой, называется адиабатическим. Первое начало термодинамики (2), применительно к адиабатическому процессу, имеет вид:

$$d'Q = 0, dU + d'A = 0 \text{ или } d'A = -dU = -C_V dT, \quad (10)$$

т.е. при адиабатическом процессе расширения или сжатия работа совершается за счет изменения внутренней энергии газа.

Поскольку

$$d'A = -dU, \text{ а } d'A = pdV \text{ и } dU = C_V dT, \text{ то } pdV = -C_V dT \quad (11)$$

Разделив выражение (7) на (11) и учитывая (9), получим:

$$1 + Vdp/(pdV) = (C_p - C_V) / C_V \text{ или } dp/p = -\gamma dV/V, \quad (12)$$

где  $\gamma = C_p / C_V$  – отношение молярных теплоемкостей (показатель адиабаты). Интегрируя выражение (12) в пределах от  $V_1$  до  $V_2$  и от  $p_1$  до  $p_2$ , а затем потенцируя его, получим уравнение адиабаты идеального газа (уравнение Пуассона):

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma \text{ или } pV^\gamma = const. \quad (13)$$

Применив уравнение состояния (1), формулу (13) можно привести к виду:

$$p_1/p_2 = (T_1/T_2)^{\gamma/(\gamma-1)} \text{ или } T_1/T_2 = (V_2/V_1)^{\gamma-1}. \quad (14)$$

Из уравнений (14) следует, что при адиабатическом расширении газ охлаждается, а при сжатии – нагревается.

На рис. 1 представлены две кривые: 1 – адиабата, 2 – изотерма. Как видно из рисунка, адиабата идет круче, чем изотерма. Это объясняется тем, что давление в адиабатическом процессе возрастает как за счет уменьшения объема, так и за счет увеличения температуры. Согласно молекулярно-кинетической теории  $C_p > C_v$  и теплоемкости выражаются через число степеней свободы  $i$  молекул:

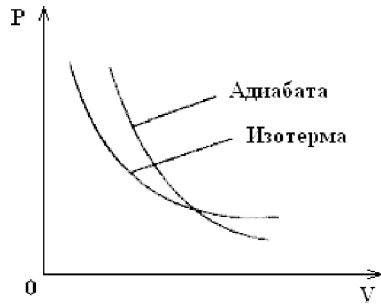


Рис. 1. Сопоставление адиабаты и изотермы идеального газа

$$C_v = iR / 2; C_p = R + iR/2; \gamma = C_p/C_v = (i+2) / i. \quad (15)$$

Под *числом степеней свободы  $i$*  молекул понимается число независимых параметров, определяющих ее положение в пространстве. Так, например, положение одноатомной молекулы в пространстве определяется тремя координатами:  $x, y, z$ , т.е.  $i = 3$ , а  $\gamma = 5/3$ ; для двухатомных газов (водород, кислород, азот и др.)  $i = 5$ , а  $\gamma = 1,4$ .

В данной работе для определения величины  $\gamma$  используется совокупность процессов в газах, одним из которых является адиабатический процесс. К этому процессу применяется соотношение (14), при этом температура начала  $T_1$  и конца  $T_2$  адиабатического перехода выражается через другие величины, которые определяются из опытов.



## 2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ

Определение показателя адиабаты проводится с помощью экспериментальной установки ФПТ1-6 (рис.2), состоящей из баллона 1, в который микро-компрессором 5 накачивается воздух; приборного блока 2; водяного манометра 3 и стойки 4.

Приборный блок делится на два модуля:

1) модуль питания «Сеть» с тумблером включения питания микрокомпрессора и светодиодом;

2) модуль «Воздух» с тумблером включения подачи воздуха в баллон и светодиодом.

Внутри приборного блока размещены: микрокомпрессор 5, баллон 1, электропневмоклапан 6, открытый при работающем компрессоре 5. Давление воздуха в баллоне 1 измеряется водяным манометром 3.

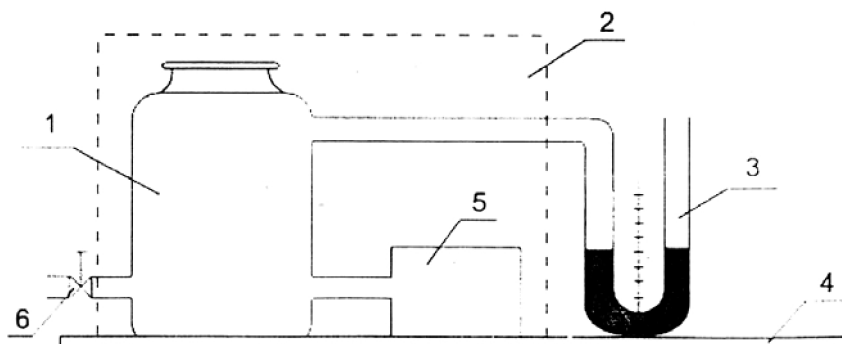


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 – баллон для воздуха; 2 – приборный блок; 3 – водяной манометр;  
4 – стойка; 5 – микрокомпрессор; 6 – кран (пневмотумблер).

### 3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

В данной работе показатель адиабаты  $\gamma = C_p / C_v$  определяется по методу Клемана-Дезорма. При накачивании в баллон воздуха над ним совершается работа, вследствие чего температура воздуха в баллоне будет несколько выше температуры окружающей среды. Затем замкнутый в баллоне объем воздуха приводится в термодинамическое равновесие с окружающей средой. Для этого после накачки воздуха следует подождать несколько минут. Вследствие теплообмена через стенки баллона температура воздуха в нем сравняется с температурой  $T_1$  окружающей среды, а давление примет значение  $p_1$ . Таким образом, перед началом адиабатического расширения состояние воздуха в баллоне характеризуется параметрами:  $p_1, V_1, T_1$ . При этом давление

$$p_1 = p_0 + \rho g h_1 \quad (16)$$

где  $p_0$  – атмосферное давление,  $\rho$  – плотность воды,  $g$  – ускорение свободного падения,  $h_1$  – разность высот уровней воды в коленях водяного манометра.

Переключением тумблера пневмоклапана «Атмосфера» осуществляется адиабатическое расширение воздуха из баллона. Тумблер включается кратковременно, при этом в баллоне устанавливается давление  $p_0$ , равное атмосферному давлению. После закрытия пневмоклапана, т.е. в конце адиабатического расширения, состояние воздуха в баллоне будет характеризоваться параметрами:  $p_0, V_1, T_2$ .

При адиабатическом расширении газа работа по его расширению совершается за счет уменьшения внутренней энергии системы, поэтому температура  $T_2$  воздуха в баллоне будет несколько меньше температуры окружающей среды. Температуру  $T_2$  в конце адиабатического расширения можно найти по изохорному процессу, который

снова приводит воздух в баллоне в термодинамическое равновесие с окружающей средой путем теплообмена через стенки баллона:

$$p_0/T_2 = p_2/T_1, \quad (17)$$

причем

$$p_2 = p_0 + \rho gh_2, \quad (18)$$

где  $h_2$  – новая разность высот уровней воды в манометре.

По условиям опыта давление  $p_2 = p_0$ . Заменяя в уравнении (14) отношение  $T_1/T_2$  из (17), получим:

$$p/p_0 = (p_2/p_0)^{\gamma/(\gamma-1)}. \quad (19)$$

Логарифмируя (19), найдем показатель адиабаты:

$$\gamma = \ln(p_1/p_0) / \ln(p_1/p_2). \quad (20)$$

Заменяя в (20)  $p_1$  и  $p_2$  соответствующими выражениями из (16) и (18) и выполнив преобразования, получим:

$$\gamma = \frac{\ln \left[ 1 + \left( \frac{\rho gh_1}{p_0} \right) \right]}{\ln \left[ 1 + \left( \frac{\rho gh_1}{p_0} \right) \right] - \ln \left[ 1 + \left( \frac{\rho gh_2}{p_0} \right) \right]}. \quad (21)$$

Для упрощения выражения (21) воспользуемся разложением функции в ряд Тейлора:

$$\ln(1+x) = x - x^2/2 + x^3/3 - \dots$$

Ограничившись первым слагаемым ряда (это можно сделать, т.к.  $h_1$  и  $h_2$  значительно меньше  $p_0$ ), будем считать:

$$\ln[1 + (\rho gh_1/p_0)] \approx \rho gh_1/p_0. \quad (22)$$

$$\ln[1 + (\rho gh_2/p_0)] \approx \rho gh_2/p_0. \quad (23)$$

Подставляя выражения (22), (23) в (21), получим формулу для расчета показателя адиабаты:

$$\gamma = h_1 / (h_1 - h_2). \quad (24)$$

При выводе формул подразумевалось, что рассматриваемый процесс является обратимым (иначе параметры состояния не имели бы определенных значений и формулы утрачивали смысл). Мы знаем, что обратимыми могут быть только процессы, протекающие бесконечно медленно. Однако осуществить не только бесконечно медленный, но даже просто очень медленный адиабатический процесс невозможно, поскольку совершенно не проводящих теплоту материалов для изготовления адиабатической оболочки не существует. Вместе с тем количество теплоты, которым обменивается тело с внешней средой, будет тем меньше, чем быстрее протекает процесс. *Следовательно, близкими к адиабатическому могут быть только достаточно быстро протекающие процессы.* Скорость процесса должна быть, с одной стороны, настолько большой, чтобы теплообменом с внешней средой можно было пренебречь, а с другой стороны, достаточно малой для того, чтобы процесс можно было считать практически обратимым.

#### 4. ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой по ее описанию, приведенном в разделе 2 «Средства измерений».

2. Убедитесь, что в манометре 3 (рис.2) уровни воды находятся на нулевой (или близкой к этому) отметке.

2. Убедитесь, что тумблеры «Сеть» и «Воздух» находятся в положении «Выкл».

3. Включите в розетку шнур питания установки.

**ВНИМАНИЕ!** Во избежание выливания воды из манометра не допускайте увеличения уровня воды в левой трубке манометра выше 200 мм.

## 5. ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ И ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Подайте на установку электропитание, включив тумблер «Сеть», при этом должна загореться сигнальная лампочка.

2. Включите тумблер «Воздух», при этом загорается сигнальная лампочка.

3. По манометру 3 контролируйте рост давления в баллоне 1. При достижении уровня жидкости в левой трубке манометра 150-200 мм, подачу воздуха в баллон прекратите, отключив тумблер «Воздух». Сразу же включите секундомер.

4. Выдержите 3-4 минуты до установления термодинамического равновесия замкнутого объема воздуха в баллоне 1 с внешней средой. При установлении равновесия высоты уровней в манометре 3 не изменяются.

5. Измерьте разность уровней  $h_1$  в манометре 3 (сложите высоты уровней жидкости в трубках).

6. Поверните ручку пневмоклапана б «Атмосфера» по часовой стрелке до щелчка. При этом баллон 1 кратковременно соединяется с атмосферой.

7. Выдержите 3-4 минуты. После стабилизации процесса (установления термодинамического равновесия), определите давление воздуха в баллоне 1, измерив разность уровней  $h_2$  в манометре 3.

8. Пневмоклапан б «Атмосфера» поверните по часовой стрелке до щелчка (в исходное положение).

9. По формуле (24) рассчитайте значение  $\gamma$ .

10. Выполните пункты 1-9 десять раз.

11. Результаты измерений занесите в табл. 1.

Таблица 1

Определение отношения теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме (показателя адиабаты)

№ п/п	$h_{1i}$ мм	$h_{2i}$ мм	$\gamma_i = h_{1i} / (h_{1i} - h_{2i})$	$\langle \gamma \rangle$	$\Delta \gamma_i$	$(\Delta \gamma_i)^2$	$S_{\langle \gamma \rangle}$
1							
2							
3							
.....							
10							

12. Поскольку в точности воспроизвести каждый опыт невозможно, то полученные значения  $h_1$  и  $h_2$  независимы и погрешности следует определять по методу прямых измерений [4]. Для этого проведите оценку случайных погрешностей измерений  $\gamma$ .

12.1. Определите среднее арифметическое значение показателя адиабаты

$$\langle \gamma \rangle = \frac{\sum \gamma_i}{n},$$

где  $n$  – число измерений.

12.2. Определите абсолютные погрешности отдельных измерений

$$\Delta \gamma_i = \langle \gamma \rangle - \gamma_i.$$

12.3. Найдите сумму  $\sum_{i=1}^n (\gamma_i)^2$ .

12.4. Вычислите среднее квадратичное отклонение

$$S_{\langle \gamma \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta \gamma_i)^2}{n \cdot (n-1)}}.$$

12.5. Определите границы доверительного интервала

$$\Delta \gamma = t_{\alpha, n} \cdot S_{\langle \gamma \rangle}.$$

Для нахождения  $t_{an}$  используйте таблицу коэффициентов Стьюдента. Доверительную вероятность  $\alpha$  примите равной 0,95.

12.6. Запишите результаты измерений в виде:

$$\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \Delta\gamma; \quad \alpha = 0,95; \quad n = 10.$$

12.7. Определите относительную погрешность измерения показателя адиабаты

$$\varepsilon = (\Delta\gamma / \langle \gamma \rangle) \cdot 100\%.$$

12.8. Проведите оценку погрешности метода измерений. Значение показателя адиабаты  $\gamma$  определите из формулы Ньютона-Лапласа:

$$c = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T / \mu},$$

где  $c = 343$  м/с – скорость звука в сухом воздухе при комнатной температуре;  $R = 8,31$  Дж/(моль · К) – универсальная газовая постоянная;  $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$  кг/моль – молярная масса воздуха. Относительную погрешность метода измерения рассчитайте по формуле:

$$\varepsilon = [ |(\gamma - \langle \gamma \rangle)| / \langle \gamma \rangle ] \cdot 100\%.$$

13. Сделайте выводы по проделанной работе.

## 6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой процесс называется адиабатическим? Какие процессы Вы еще знаете?
2. Что такое число степеней свободы молекулы? Как можно найти значения  $C_p$  и  $C_v$  идеального газа через число степеней свободы его молекул?
3. Почему  $C_p > C_v$  и на сколько? Покажите это аналитически.
4. Выведите уравнение Пуассона.
5. На чем основан метод Клемана-Дезорма?
6. Почему адиабатическое сжатие газа сопровождается повышением температуры, а адиабатическое расширение – понижением температуры?
7. Выведите расчетную формулу (24) для определения показателя адиабаты.

## 7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев, И.В. Курс физики. Т. 1 / И.В. Савельев. – М.: «Наука», 1989.
2. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Т. 2 / Д.В. Сивухин. – М.: Физматлит, 2002.
3. Руководство к лабораторным работам /Под ред. Л.Л. Гольдина. – М.: «Наука», 1964.
4. Практические рекомендации по обработке результатов измерений: Методические указания /Сост.: Л.П. Муркин, Н.М. Мышкина. – Куйбышев: КуАИ, 1992.
5. Кожевников, А.М. Определение показателя адиабаты воздуха методом Клемана-Дезорма / А.М. Кожевников, А.Ф. Малеев. – Куйбышев: КуАИ, 1989.



*Учебное издание*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ  
ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ  
ДАВЛЕНИИ И ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ  
(ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ)  
МЕТОДОМ КЛЕМАНА – ДЕЗОРМА

*Методические указания  
к лабораторной работе № 1-27*

Составители: ***Николай Михайлович Рогачев  
Светлана Ивановна Гусева***

Редактор И.И. Спиридонова  
Вёрстка – И.И. Спиридонова

Подписано в печать 02.011.2012. Формат 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ . Арт. Д1(12)/2012.

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

---

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