

Федеральное агентство по образованию

**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования**

**Санкт-Петербургский государственный
технологический университет
растительных полимеров**

Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА C_p/C_v

Методические указания
к лабораторным работам
по курсу «Техническая термодинамика»
для студентов дневного и вечернего отделений

Специальности 140104 «Промышленная теплоэнергетика»
140105 «Энергетика теплотехнологий»

**Санкт-Петербург
2010**

УДК 622.1.016.7(076)

ББК 31.31

О-926

Определение отношения теплоемкостей воздуха C_p/C_v : методические указания к лабораторным работам по курсу «Техническая термодинамика» для студентов дневного и вечернего обучения/сост. В.Г. Злобин, С.В. Горбай, Т.Ю. Короткова, Э.Р. Алиев; ГОУВПО СПбГТУРП. СПб., 2010. –14 с.

В методических указаниях излагаются цель, задачи определения экспериментальным путем значения показателя адиабаты k для воздуха и содержание выполнения лабораторной работы.

Предназначены для студентов 2-го курса специальностей 140104 «Промышленная теплоэнергетика» и 140105 «Энергетика теплотехнологий»

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой теплосиловых установок и тепловых двигателей ГОУВПО Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров (протокол № 3 от 25.12.2009 г.).

Утверждены к изданию методической комиссией факультета промышленной энергетики ГОУВПО СПбГТУРП (протокол №4 от 28.12.2009г.).

© ГОУВПО Санкт-Петербургский
государственный технологический
университет растительных полимеров, 2010

Цель работы

Определить экспериментальным путем значения показателя адиабаты $k = C_p / C_v$ для воздуха и сравнить с табличной величиной.

1. Теоретические основы работы

Теплоемкостью C_T тела называется физическая величина, численно равная количеству тепла, которое надо передать телу, чтобы повысить его температуру на один градус:

$$C_T = \frac{Q}{\Delta T} \quad (1.1)$$

или $C_T = \frac{dQ}{dT} \quad (1.2)$

В системе СИ единицы теплоемкости $[C_T] = \text{Дж} / \text{град}$.

Удельной теплоемкостью вещества называется теплоемкость единицы массы этого вещества:

$$c = \frac{C_T}{m} = \frac{dQ}{m dT}. \quad (1.3)$$

В системе СИ единицы теплоемкости $[c] = \text{Дж} / (\text{кг} \cdot \text{град})$.

Молярной теплоемкостью вещества называется теплоемкость одного моля этого вещества:

$$C_\mu = \frac{C_T}{\nu} = \frac{\mu \cdot C_T}{m} = \frac{\mu \cdot dQ}{m \cdot dT}, \quad (1.4)$$

где $\nu = \frac{m}{M}$ – число молей, содержащихся в m кг вещества;

μ – молярная масса вещества.

Используя первое начало термодинамики и определение молярной теплоемкости, можно выразить ее через изменение внутренней энергии и работу газа.

$$C_m = \frac{dU_m}{dT} + \frac{dA_m}{dT}. \quad (1.5)$$

Важной особенностью газов является то, что для различных процессов (изо процессов) теплоемкость газа своя.

Для изохорического процесса $C_{\mu V} = \frac{i}{2} \mu R$, для изобарического процесса $C_{\mu P} = \frac{i+2}{2} \mu R$,

где i - число степеней свободы молекул данного газа;

μR – универсальная газовая постоянная.

Важной характеристикой свойств газов является величина:

$$k = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}. \quad (1.6)$$

Эта величина входит в уравнение, связывающая друг с другом параметры состояния идеального газа в адиабатическом процессе:

$$pV^k = const. \quad (1.7)$$

Адиабатическим процессом называется процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой, то есть газ не отдает и не получает тепла извне. Уравнение (1.7) называется уравнением Пуассона, входящая в него константа k – коэффициентом Пуассона.

1.1 Постановка задачи

В настоящей работе для измерения величины k используется метод, предложенный в 1819 г. Клеманом и Дезормом. Суть метода заключается в следующем. Берется некоторая масса газа в состоянии 1 с параметрами состояния p_1 , T_1 и адиабатически расширяется, переходя в состояние 2 с параметрами p_2 , T_2 . Из уравнения (1.7) с учетом уравнения состояния идеального газа следует:

$$p_1^{\frac{1}{k}-1} T_1 = p_2^{\frac{1}{k}-1} T_2. \quad (1.8)$$

Затем газ изохорически нагревается до исходной температуры T_1 . При этом давление возрастает до величины p_3 (состояние 3). Параметры состояний 2 и 3 связаны соотношением:

$$\frac{p_3}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}. \quad (1.9)$$

Исключив из уравнений (1.8) и (1.9) отношение T_1/T_2 , получим:

$$k = \frac{\ln p_1/p_2}{\ln p_1/p_3}. \quad (1.10)$$

На практике метод Клемана-Дезорма реализуется следующим образом (Рис.1).

В жесткую емкость 1 накачивается воздух насосом 2 при открытом кране 3 до давления p_1 , превышающее атмосферное на 2000÷2500 Па (200÷250) мм.вод. столба, после чего кран 3 закрывают. После установления термодинамического равновесия воздуха в емкости с окружающей средой (состояние 1 на Рис.2) открывается клапан 4, соединяющий баллон с атмосферой. Излишек воздуха выходит из емкости, давление в емкости падает до атмосферного, температура падает несколько ниже комнатной (состояние 2 на Рис. 2). Этот процесс протекает достаточно быстро (за время 0,1÷0,5 с), поэтому теплообменом емкости с атмосферой можно пренебречь, то есть считать процесс расширения воздуха адиабатическим. Затем клапан 4 закрывают и выжидают некоторое время, пока оставшийся в емкости воздух не нагреется до комнатной температуры (состояние 3 на Рис. 2).

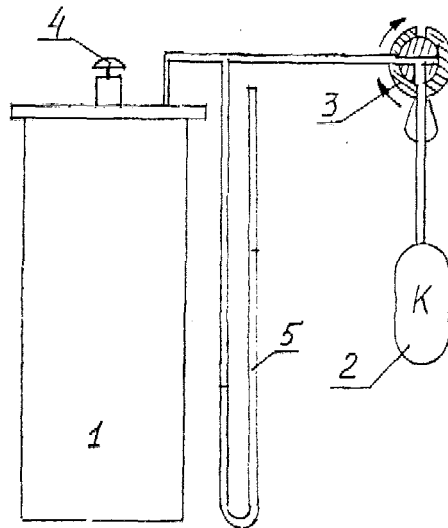


Рис.1. Схема лабораторной установки

Параметры состояния 1 и 2 связаны уравнением адиабаты в виде:

$$p_1 V_1^k = p_2 V_2^k, \quad (1.11)$$

где V_2 – объем воздуха при давлении p_2 , равный объему емкости в состоянии 2;

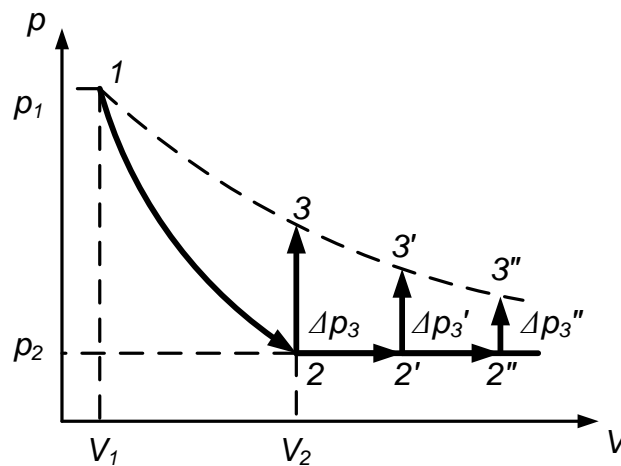


Рис.2. Диаграмма $p - V$

V_1 – объем воздуха при давлении p_1 , т.е. той части воздуха, которая осталась в емкости после адиабатического расширения воздуха.

Параметры состояния воздуха в точках 1 и 3 принадлежат одной изотерме.

Поэтому:

$$p_1 V_1 = p_3 V_2. \quad (1.12)$$

Из уравнений (1.11) и (1.12) следует выражение для k (1.10), которое можно упростить, используя небольшое отличие давлений p_1 и p_3 от атмосферного давления p_2 :

$$k = \frac{\ln p_1 / p_2}{\ln p_1 / p_3} = \frac{\ln \left(1 + \frac{p_1 - p_2}{p_2} \right)}{\ln \left(1 + \frac{p_1 - p_3}{p_3} \right)} = \frac{\ln(1 + \alpha)}{\ln(1 + \beta)}, \quad (1.13)$$

где $\alpha \ll 1$ и $\beta \ll 1$.

Используя первый член разложения величины $\ln(1+x)$ в ряд Маклорена, получим:

$$k = \frac{(p_1 - p_2)p_3}{(p_1 - p_3)p_2} \approx \frac{p_1 - p_2}{p_1 - p_3} = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 - \Delta p_3}, \quad (1.14)$$

где $p_1 = p_2 + \Delta p_1$;
 $p_3 = p_2 + \Delta p_3$.

Анализируя полученное соотношение (1.14) приходим к выводу, то для определения k удобно использовать U – образный жидкостной манометр, у которого разность уровней жидкости в сообщающихся трубках пропорциональна разности между измеряемыми давлениями и атмосферным.

При этом (1.14), где $\Delta p_1 = \rho g \Delta H_1$ и $\Delta p_3 = \rho g \Delta H_3$, запишем в виде:

$$k = \frac{\Delta H_1}{\Delta H_1 - \Delta H_3}. \quad (1.15)$$

1.2 .Методика проведения эксперимента и расчетные соотношения

Применяемая методика определения величины k требует выполнения следующих условий:

1. В процессе 1-2 выпускной клапан емкости баллона должен быть перекрыт в момент когда давление в емкости станет равным атмосферному p_2 .

2. Время τ , в течение которого давление в емкости уменьшается от p_1 до p_2 должно быть достаточно мало, чтобы пренебречь теплообменом воздуха, находящегося в емкости, с окружающей средой.

Практически эти условия выполнить трудно, поскольку для получения величины k с относительной погрешностью 2% необходимо вручную открыть клапан на 0,1 с, что является для экспериментатора весьма сложной задачей. Поэтому для получения значений k с приемлемой погрешностью применяют различные методы учета факторов, указанных в п.п. 1 и 2. Рассмотрим один из них.

Предположим, что после достижения давления p_2 клапан сброса остается открытым еще некоторое время τ . За это время происходит изобарический нагрев (процесс 2-2' на Рис. 2) воздуха за счет теплообмена со стенками емкости, а также продолжающееся истечение газа через открытый клапан за счет его расширения.

После закрытия клапана (состояние 2'), происходит изохорический нагрев (процесс 2'-3'). Давление в емкости достигает $p_2 + \Delta p_3'$. Конечное состояние (точка 3') находится на изотерме 1-3-3'-3". При этом $\Delta p_3 > \Delta p_3' > \Delta p_3''$.

Будем считать, что при адиабатическом расширении воздуха теплообмена со стенками емкости не происходит. Рассмотрим процесс 2-2'. За время $d\tau$ воздух получит от стенки емкости некоторое количество тепла равное:

$$mc_p dT = -\alpha(T - T_1)d\tau, \quad (1.16)$$

где α – коэффициент теплоотдачи;

T – температура воздуха в момент времени τ ;

T_1 – температура стенки емкости, равная температуре воздуха в состоянии 1;

m – масса воздуха в емкости (переменная величина).

Решая уравнение (1.16) для процесса 2-2', получим:

$$\ln \frac{T - T_1}{T} = - \frac{\alpha R T_1}{p_2 V_1 c_p \mu} \tau + \ln A. \quad (1.17)$$

Константу A найдем из граничных условий: при $\tau = 0$, $A = (T_2 - T_1)/T_2$.

При этом следует иметь в виду, что масса воздуха в процессе 2-2' величина переменная:

$$m = \frac{p_2 V_1 \mu}{RT}.$$

Уравнение (1.17) можно записать в виде:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta T_2}{T_2} \exp\left(-\frac{\alpha}{m_1 c_p} \tau\right), \quad (1.18)$$

где T_2 – температура воздуха после адиабатического расширения в состоянии 2;

ΔT_2 – изменение температуры воздуха в адиабатическом процессе.

Рассмотрим процесс изохорического нагрева 2-3. Процесс нагревания газа от исходного состояния 2 можно выразить соотношением:

$$\Delta p = p_2 \frac{\Delta T}{T_1 - \Delta T}, \quad (1.19)$$

где p_2 и $(T_1 - \Delta T)$ – параметры в точке 2.

Для адиабатического процесса 1-2 при малых изменениях Δp_1 и ΔT_2 запишем:

$$\frac{\Delta T_2}{T_1} = \frac{k-1}{k} \cdot \frac{\Delta p_1}{p_1}. \quad (1.20)$$

Решая систему уравнений (1.18),(1.19),(1.20) и пренебрегая малыми величинами второго порядка, получим:

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p} = \frac{k}{k-1} \exp\left(-\frac{\alpha}{m_0 c_p} \tau\right). \quad (1.21)$$

Соотношение (1.21) позволяет определить величину k по измеренной разности $\Delta h = \Delta p / \rho g$ столбов жидкости в U – образном манометре при различном времени τ открытия клапана емкости.

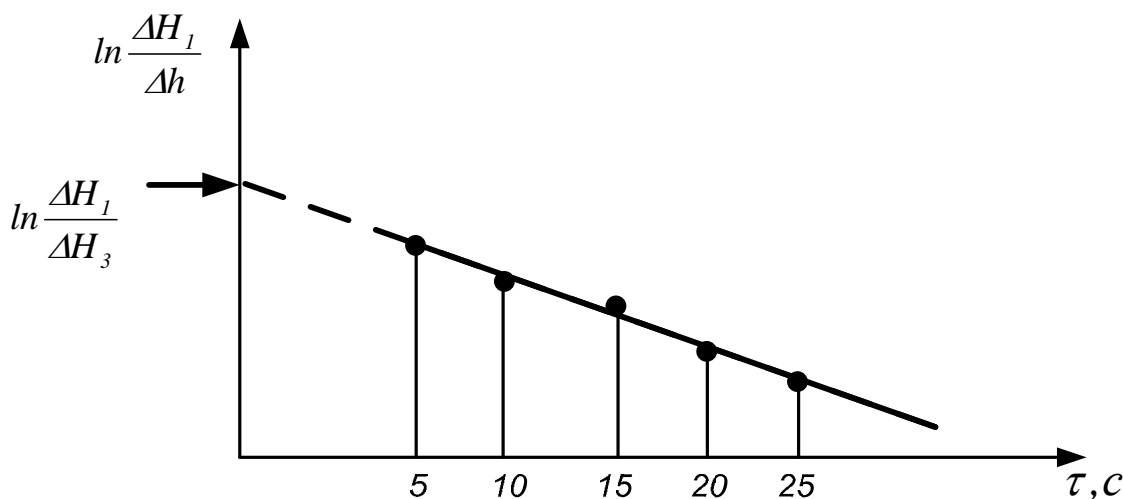


Рис.3. График зависимости $\ln \frac{\Delta H_1}{\Delta h} = f(\tau)$

График зависимости $\ln \frac{\Delta H_1}{\Delta h} = f(\tau)$ является линейной функцией (рис.3), экстраполируя которую до $\tau = 0$ можно отсечь на оси координат отрезок равный $\ln \frac{\Delta H_1}{\Delta H_3} = \ln \left(\frac{k}{k-1} \right)$.

Строго говоря, в приведенном методе измеряется сумма времени запаздывания $(\tau - t_0)$ и времени протекания адиабатического процесса t_0 . Но в условиях опыта t_0 пренебрежительно мало по сравнению с τ .

2. Описание экспериментальной установки

В стеклянный баллон 1 (Рис.1), соединенный с компрессором 2, через напускной клапан 3 накачивается воздух. Клапан сброса воздуха 4, находящийся на верхней крышке установки позволяет резко уменьшить давление в баллоне практически без теплообмена с окружающей средой. На рис.1 представлена передняя панель установки 6, на которой размещаются тумблер «СЕТЬ» 7, тумблер «КОМПРЕССОР» 8, водяной U – образный манометр 5, кран 3 перепуска воздуха со следующими положениями:

«ОТКРЫТ» – положение ручки крана на данной отметке открывает линию к компрессору 2.

«ЗАКРЫТ» – положение ручки крана на данной отметке перекрывает баллон 1.

«РЕГУЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ» – положение ручки крана на данной отметке позволяет отрегулировать уровень воды в коленях U – образного манометра после заполнения баллона воздухом.

Измеряемые величины: ΔH_1 и Δh – разница высот столбов жидкости в манометре в начале и в конце опыта.

Установка работает следующим образом.

В баллон с воздухом 2 накачивается воздух до определенного избыточного давления (разность уровней в коленях U – образного манометра должна составлять: $\Delta H_1 = (20 \div 25)$ см. В каждой серии опытов эта разность должна быть одинаковой (регулируется краном 3). После выравнивания температур воздуха в баллоне и окружающей среды, осуществляется сброс давления через выпускное отверстие с клапаном. При этом клапан удерживается в открытом состоянии определенное время (5 до 25 с.) После того, как клапан сброса закрылся, осуществляется изохорный процесс теплообмена с окружающей средой. Температура воздуха в баллоне приближается к температуре окружающей среды, а разность уровней в U – образном манометре увеличивается до величины Δh .

3. Порядок выполнения работы

Заполните таблицу 1

Таблица 1. Спецификация измерительных приборов.

Наименование прибора и его тип	Пределы измерения	Цена деления	Инструментальная погрешность
Линейка	0 ÷ 400 мм	1 мм	1 мм
Секундомер	0 ÷ 3600 с	0,2 с	0,2 с

1. Включить установку тумблером «СЕТЬ», повернуть ручку крана 3 в положение «ОТКРЫТ» (положение 9), Рис. 4. Включить тумблером 8 «КОМПРЕССОР». Установить разность уровней воды в манометре составляла 200÷250 мм. После этого поворотом ручки крана 3 в положение «ЗАКРЫТ» (положение 10).

2. Подождать 2-4 минуты до тех пор, пока температура воздуха в баллоне не станет равна температуре окружающей среды.

3. Произвести дополнительную регулировку разности уровней в манометре, стремясь к тому, чтобы в каждом опыте эта разность была постоянной. При этом ручка крана 3 плавно переводится в положение «РЕГУЛИРОВКА УРОВНЯ» (положение 11 на Рис.4) и обратно.

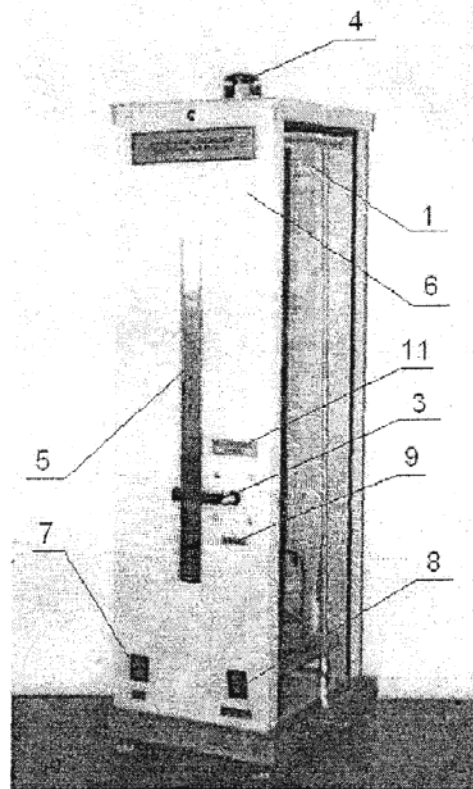
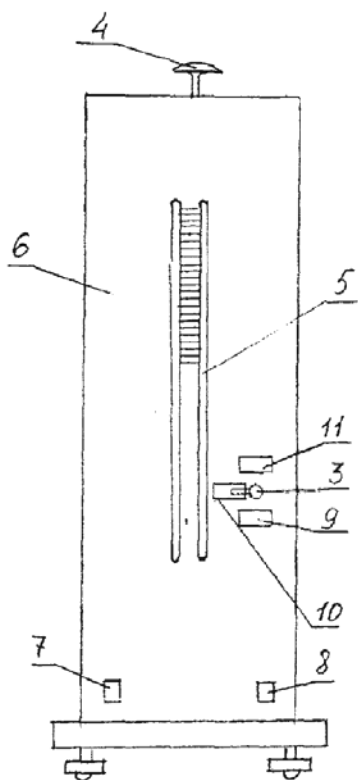


Рис.4. Лабораторная установка по определению отношения теплоемкостей воздуха C_p/C_v

4. По нижнему уровню мениска определить уровни H_1 и H_2 в коленах манометра. Записать эти значения, а также их разность в таблицу.

5. Резко (но не сильно) нажать выпускной клапан 4 и через 5 с закрыть его (отпустить).

6. Через 3÷4 минуты, после того как уровни воды в манометре стабилизируются, определить значения уровней h_1 и h_2 и занести результаты в таблицу.

7. Повторить опыт (пункты 1÷6), увеличивая время, в течение которого клапан остается открытым (10, 15, 20, 25 с.).

Таблица результатов эксперимента

$\tau, с$	$H_1(t), мм$	$H_2(t), мм$	$\Delta H, б$	$h_1, мм$	$h_2, мм$	$\Delta h, мм$
5						
10						

15						
20						
25						

4. Обработка результатов

1. Вычислить $\Delta H_1 = H_1 - H_2$.
2. Вычислить $\Delta h(\tau) = h_1 - h_2$.
3. Определить величину $A = \ln \frac{\Delta H_1}{\Delta H_3}$ графической экстраполяцией функции $\ln \frac{\Delta H_1}{\Delta h} = f(\tau)$ до $\tau = 0$.
4. Рассчитать $\frac{\Delta H_1}{\Delta H_3} = e^A$.
5. Определить $k = \frac{1}{1 - \frac{\Delta H_3}{\Delta H_1}}$. (1.22)
6. Из графика зависимости $\ln \frac{\Delta H_1}{\Delta h} = f(\tau)$ по отклонению экспериментальных точек от средней прямой определить погрешность определения величины $\ln \frac{\Delta H_1}{\Delta H_3}$.
7. Рассчитать абсолютную погрешность определения величины k :

$$\Delta k = k \left(2 \frac{\Delta(\Delta H_1)}{\Delta H_1} + \frac{\Delta(\Delta H_3)}{\Delta H_3} \right). \quad (1.23)$$

5. Контрольные вопросы

1. Дайте определение адиабатическому процессу.
2. Какие факторы влияют на точность экспериментального определения коэффициента Пуассона?

3. Какие термодинамические процессы происходят в емкости с воздухом при проведении опыта?
4. Какие величины измеряются в опыте?
5. Вывести соотношение для экспериментального определения коэффициента Пуассона.
6. Как исключить факторы, влияющие на точность определения показателя Пуассона?

Библиографический список

1. Балахонцев Е.В., Мурзаков В.В. техническая Термодинамика.-М.: Высшая школа, 1981.
2. Кирилин В.А., Сычев В.В., Шейдлин А.Е. Техническая термодинамика. Энергия, 1998
3. Кудинов В.А., Карташов Э.М. Техническая термодинамика. М.; Высшая школа, 2002.

СОДЕРЖАНИЕ

Цель работы.....	3
1. Теоретические основы работы.....	-
1.1 Постановка задачи	5
1.2 Методика проведения эксперимента и расчетные соотношения.....	8
2. Описание экспериментальной установки.....	10
3. Порядок выполнения работы.....	11
4. Обработка результатов.....	13
5. Контрольные вопросы.....	14
Библиографический список.....	-

Владимир Германович Злобин
Светлана Вячеславовна Горбай
Татьяна Юрьевна Короткова
Эдуард Русланович Алиев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ВОЗДУХА C_p/C_v

Методические указания
к лабораторным работам
по курсу «Техническая термодинамика»
для студентов дневного и вечернего обучения

Редактор и корректор Басова В.А.
Техн. редактор Титова Л.Я.

Подп. к печати 21.05. 2009г. Формат 60x84/16. Бумага тип №1.

Печать офсетная. Объем 1,0 печ.л. 1,0 Уч.-изд.л. Тираж 250 экз.

Изд.№ 10 Цена «С». Заказ

Ризограф ГОУВПО Санкт-Петербургского государственного
технологического университета растительных полимеров, 198095, Санкт-
Петербург, ул. Ивана Черных,4