

## БАРЬЕРНО-ПОВЕРХНОСТНЫЙ РАЗРЯД НА ДВУХЖИЛЬНОМ ПРОВОДЕ

Боромбаев М.К., Шаршенбиев К.А., Малютина О.А..

*Исыккульский государственный университет, Кыргызстан, г. Каракол.*

Приведены результаты осциллографирования барьерно-поверхностного разряда на двухжильном проводе. Исследованы статическая вольтамперная и вольт кулоновская характеристики разряда. Приведены данные по синтезу озона из воздуха в данном разряде.

**Введение.** Озон находит широкое применение в сельском хозяйстве, медицине, химической промышленности и других отраслях. В настоящее время признанным способом синтеза озона является барьерный разряд (БР), позволяющий получать большие концентрации озона при небольших энергозатратах [1,2].

Энергетические временные и усредненные характеристики изучаются с помощью осциллографирования тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$ , а также вольт кулоновской характеристики с циклограммы  $q(U)$ , где  $q$ -заряд, переносимый током разряда:

$$q(t) = \int_0^t I(t') dt'.$$

Различают динамические и статические ВАХ. Под первыми понимают связь между мгновенными значениями тока и напряжения. Статическая ВАХ определяется обычно как зависимость среднего значения тока разряда от приложенного напряжения и имеет вид двух пересекающихся прямых [1,3].

Более эффективным в плане производительности озона является барьерно-поверхностный разряд (БПР), предложенный С.Масудой [4] и независимо от него В.С.Энгельштом [5,6]. Существует большое множество модификаций БПР, отличающихся эффективностью и режимами работы [7,8].

В 1992 году был предложен озонатор с барьерно-поверхностным разрядом на двухжильном проводе [9]. Диэлектрическим барьером в нем служит обмотка провода из поливинилхлорида (ПВХ). Жилы провода озонатора играют роль электродов. При подаче высокого переменного напряжения на жилы двухжильного провода возникает БПР, состоящий из множества микроискр. Визуальные наблюдения показывают, что при напряжении около 3,5кВ на перемычке появляется разряд, а с увеличением напряжения до 8,5кВ он покрывает всю поверхность диэлектрика. Причина появления разряда на поверхности диэлектрика заключается в том, что из-за возникновения высокой разности

потенциалов между жилами провода также возникает напряженность поля на поверхности самого диэлектрика, при этом свободные затравочные электроны воздуха разгоняются и создают лавины, стримеры путем ионизации. Основное применение этого разряда – озонирование воздуха.

БПР отличается от барьерного разряда динамической емкостью  $C$ , обусловленной покрытием диэлектрика плазмой разряда [10]. Этот вид разряда мало исследован.

В данной работе изучается БПР на двухжильном проводе. Исследованы статические вольт-амперные характеристики (ВАХ), вольт кулоновские характеристики (ВКХ) БПР, приведены данные по синтезу озона из воздуха в данном разряде.

**1. Экспериментальная установка и методы измерения.** Двухжильный провод (длиной от 1 до 15 метров) помещался в герметизированный ящик размерами: длина 1,2 м, ширина 0,4 м, высота 0,4 м, объем  $0,2 \text{ м}^3$ , изготовленный из текстолита. Озоно-воздушная смесь перемешивалась встроенным вентилятором. С помощью компрессора небольшое количество газа отбиралось из ящика для определения концентрации озона. Двухжильный провод (озонатор) подсоединяется к высоковольтному трансформатору ТГ-1020КУ-2, на который подается переменное напряжение.

Электрическая схема регистрации осциллограмм показана на рис.1.

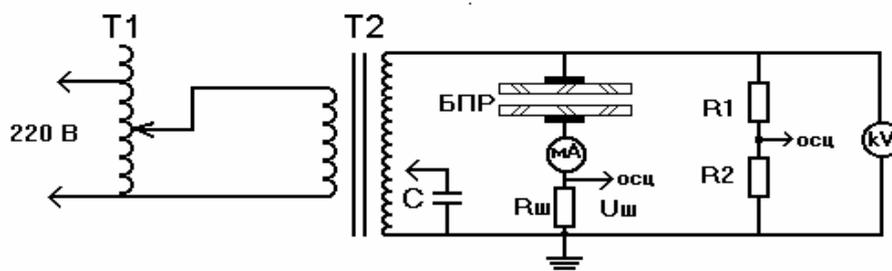


Рис.1.Электрическая схема регистрации осциллограмм.

*T1- лабораторный автотрансформатор; T2- ТГ-1020КУ-2 -высоковольтный трансформатор; БПР- барьерно-поверхностный разряд; mA- миллиамперметр; кV-киловольтметр; R<sub>1</sub> и R<sub>2</sub>-делитель напряжения; R<sub>ш</sub>- шунт; C- измерительный конденсатор.*

При регистрации циклограммы (ВКХ) использовалась электрическая схема рис.1, где шунт заменялся на измерительный конденсатор. Мгновенные значения тока и напряжения определялись с помощью двухлучевого осциллографа с известным сопротивлением шунта и коэффициентом делителя [11]. Измерения проводились при частоте  $\nu=50\text{Гц}$ .

Снятые типичные осциллограммы тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$  и циклограммы  $q(U)$  приведены на рис.2 и 3, соответственно.

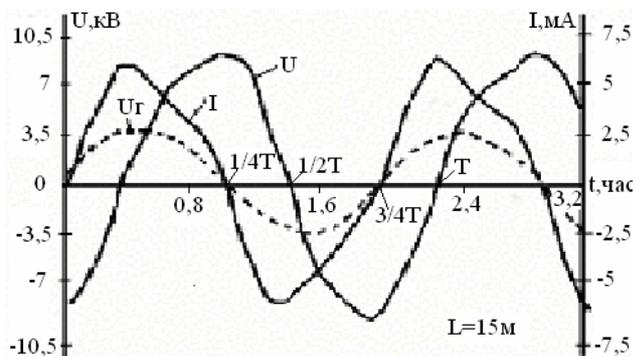


Рис.2 Осциллограмма тока и напряжения БПР при  $U_{эф}=6кВ$ ,  $U_c(t)$  – напряжение горения.

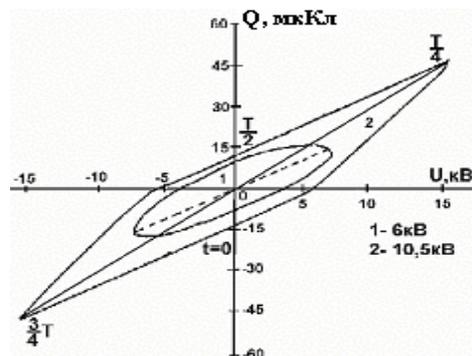


Рис.3. Циклограмма БПР при  $U_{эф}=6кВ$  и  $U_{эф}=10кВ$ .

## 2. Обработка осциллограмм и циклограмм.

Обработка осциллограмм  $I(t)$  и  $U(t)$ . Из осциллограмм тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$  определяются следующие величины:

средний ток:  $I_{cp} = 2/T \int_0^{T/2} I(t) dt$ ,

эффективные значения

тока:  $I_{эф} = \sqrt{2/T \int_0^{T/2} I_i^2 dt}$  ;

эффективные значения

напряжения:  $U_{эф} = \sqrt{2/T \int_0^{T/2} U_i^2 dt}$  ;

полная мощность (ВА) [12]:  $N = I_{эф} U_{эф}$ ,

активная мощность:  $W = 2/T \int_0^{T/2} I(t)U(t) dt$  ;

реактивная мощность:  $N_p = \sqrt{N^2 - W^2}$  ;

общая емкость озонатора:  $C = I_{cp}^2 / 2\pi\nu N_p$ .

При вычислении интегралы заменяются суммой, например:  $I_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^n I_i$  .

По площади циклограммы определяется активная мощность разряда [1]:

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T U(t)I(t)dt \equiv \oint U(q)dq .$$

В [11] предполагается, что отрезок, отсекаемый средней линией циклограммы  $3/4 T \div T/4$  и ее образующей вдоль  $U(t)$  при фиксированном значении  $q$  есть напряжение горения на разряде (см. рис.3).

В данной работе нами предложен метод нахождения значения среднего тока  $I_{cp}$  из циклограммы (см. рис.3). Достоинство этого метода заключается в следующем. Осциллограф сам интегрирует ток. Нахождение  $I_{cp}$  значительно проще, чем интегрировать осциллограмму тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$ .

Интегрируя формулу по заряду получим:

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_{3/4T}^{T/4} I(t) dt = \frac{2}{T} \int_{-q_{max}}^{q_{max}} dq = \frac{2}{T} [q_{max} - (-q_{max})] = \frac{4}{T} q_{max}.$$

### 3 Результаты эксперимента и их анализ.

*Динамические характеристики БПР.* На двухжильном проводе наблюдается отличие формы тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$  от синусоиды. Ток на двухжильном проводе непрерывно меняется (не исчезает) в отличие от классического БР [13]. Напряжение горения разряда  $U_r(t)$  синхронно меняется с током разряда (см.рис.2), как оно и должно быть при активной нагрузке (разряд). Между напряжением питания  $U(t)$  и током разряда  $I(t)$  сдвиг фаз составляет  $90^\circ$ .

Для классического барьерного разряда напряжение горения разряда является величиной постоянной [13]. На рис.4 показано максимальное напряжение горения БПР для  $L=1\text{м}$  и  $15\text{м}$  от  $U_{эф}$ . В нашем случае напряжение горения на двухжильном проводе является величиной переменной и возрастает с увеличением питающего напряжения. При  $U_{эф}=8,5\text{кВ}$  практически вся поверхность диэлектрика покрыта плазмой когда  $L=15\text{м}$ , и дальнейшее повышение напряжения питания не приводит к увеличению протяженности разряда и напряжения горения [12]. На двухжильном проводе максимальное значение напряжения горения не зависит от длины провода (см. рис.4). Здесь можно отметить, что значение напряжения горения на двухжильном проводе мало ( $U_r=3,5\div 5\text{кВ}$ ) и все время меняется в отличие от напряжения горения классического барьерного разряда [13].

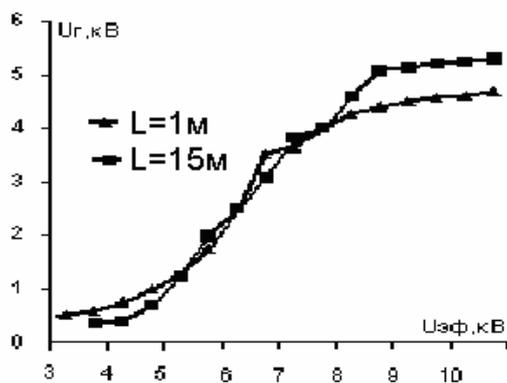


Рис.4 Зависимость максимального напряжения горения  $U_2$  от  $U_{эф}$ .

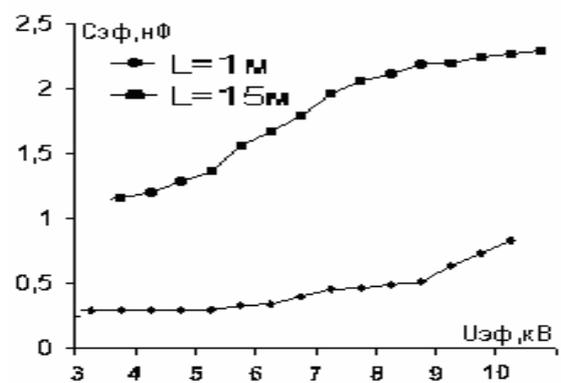


Рис.5. Зависимость динамической ёмкости  $C$  БПР от  $U_{эф}$ .

На рис. 5 приведена зависимость емкости БПР от эффективного напряжения. Емкость  $C$  озонатора при повышении напряжения возрастает нелинейным образом. После  $U_{эф}=8,5\text{кВ}$ , она перестает увеличиваться при длине провода  $L=15\text{м}$ , как и в зависимости  $U_r=f(U_{эф})$ . Из рис.5 видно, что при  $U_{эф}=8,5\text{кВ}$  практически вся поверхность диэлектрика

покрывается плазмой и дальнейшее повышение  $U_{эф}$  не приводит к увеличению емкости  $C$  разряда.

*Статические характеристики БПР.* Статическая ВАХ БПР на двухжильном проводе приведена на рис.6. Из рис.6 видно, что статическая ВАХ разряда имеет нелинейный вид и отличается от классического БР [3], по видимому, из-за наличия динамической емкости озонатора. С увеличением длины двухжильного провода значение среднего тока растет. До напряжения 3,5 кВ протекает ток смещения [11], обусловленный малой емкостью электродов разряда. Увеличение тока после 3,5кВ обусловлено ростом динамической емкости, которая увеличивается после зажигания разряда и покрытием плазмы поверхности диэлектрика [12]. Вычисленные значения среднего тока хорошо согласуются со значениями среднего тока найденными по осциллограммам (см. рис.6.).

*Мощностные характеристики БПР.* Когда сдвиг фаз  $\phi$  между кривыми тока и напряжения равен  $\pi/2$ , то выделяемая активная мощность в озонаторе обусловлена искажением формы кривой тока [14]. На рис.4 приведена зависимость активной  $-W$  мощности БПР от эффективного напряжения. Активная мощность  $-W$  озонатора при повышении напряжения на озонаторе возрастает нелинейным образом. После  $U_{эф}=8,5$ кВ, она перестает увеличиваться при длинах провода  $L=10$  и  $15$ м, так как практически вся поверхность диэлектрика покрывается плазмой.

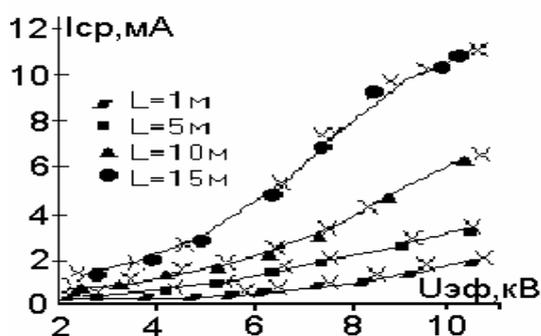


Рис.6 Статическая вольт-амперная характеристика разряда;  $x$ -средний ток по циклограмме.

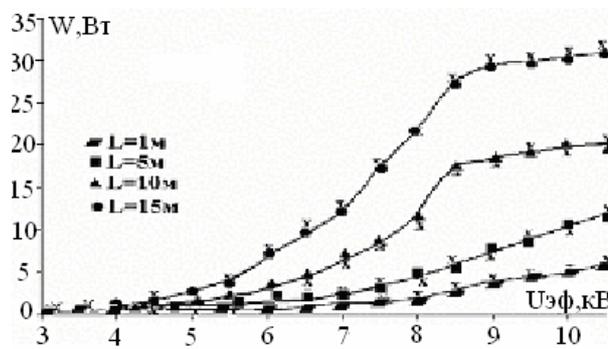


Рис.7. Зависимость активной  $W$  мощности БПР от  $U_{эф}$ .  $x$ -активная мощность вычисленная по циклограмме.

Активная мощность  $W$ , найденная по циклограмме [1], хорошо согласуется с вычисленной  $W$  по осциллограммам тока и напряжения. Отметим, что циклограмма БПР двухжильного провода принципиально отличается от циклограммы классического БР тем, что не имеет формы параллелограмма.

*Синтез озона в барьерно-поверхностном разряде.* Концентрация озона определялась

йодометрическим методом [15]. Из полученных данных был построен график зависимостей концентрации озона от времени синтеза при фиксированном переменном напряжении  $U_{\phi}=10\text{кВ}$  и отборе газа  $V_r=0,6\text{ л/мин}$  (рис.8).

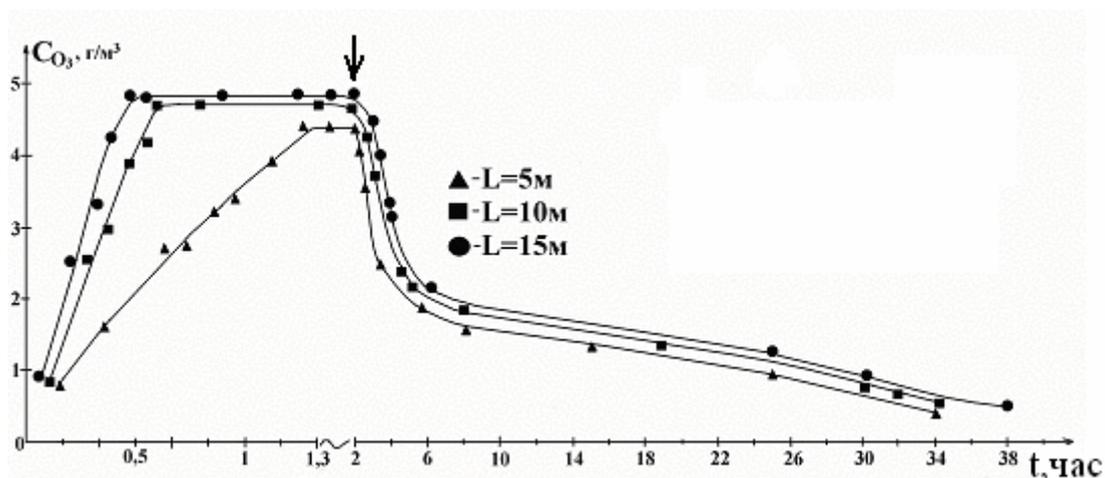


Рис.8 Зависимость концентрации озона от времени синтеза при  $U_{\phi}=10\text{кВ}$ .

Стрелкой показан момент выключения озонатора.

Из рис.8 видно, что с увеличением времени синтеза концентрация озона растет. Насыщение наблюдается на всех длинах двухжильного провода  $L=5\text{м}$   $t=75\text{мин.}$ ,  $L=10\text{м}$   $t=34\text{мин.}$  и  $L=15\text{м}$   $t=27\text{мин.}$  Таким образом, чем больше длина двухжильного провода, тем меньше время синтеза до насыщения озона. При дальнейшей работе озонатора, после достижения насыщения, концентрация озона остается постоянной. Это связано с тем, что озон склонен к разложению. Одной из причин распада озона является нагрев проводов и разрушение озона самим разрядом.

Отметим, что в реакторе достигается максимальная концентрация озона  $C=4\div5\text{ г/м}^3$  независимо от длины провода. После выключения озонатора концентрация озона уменьшается, т.е. происходит медленный распад озона (рис.8).

По известной концентрации озона была рассчитана наработка озона (рис.9).

Из рис.9 видно, что в начальный

момент времени наработка озона при различной длине провода имеет максимальное значение:  $G_{O_3}=1,3\div2,7\text{г/час}$ , т.е. зависит от длины провода. Далее с течением времени синтеза наблюдается уменьшение наработки озона. Точка нуля приходится на время, когда концентрация озона достигает своего насыщения.

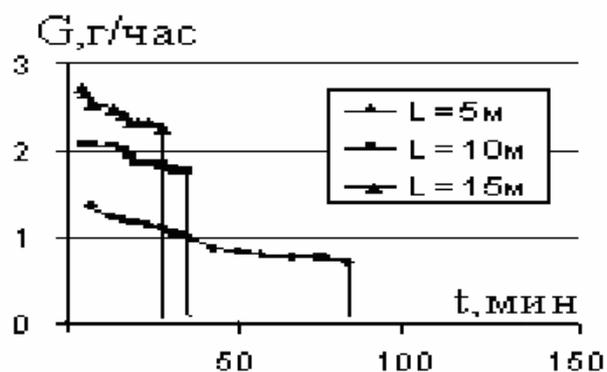


Рис.9 Зависимость наработки озона от времени синтеза при  $U_{\phi}=10\text{кВ}$ .

По известной наработке озона и активной мощности, для каждой длины провода разной, были рассчитаны энергозатраты на синтез озона (рис.10). Энергозатраты на наработку озона вначале медленно растут пока не достигнуто насыщение и составляют  $Q_{O_3}=10\div 20\text{кВт}\cdot\text{час}/\text{кг}O_3$ .

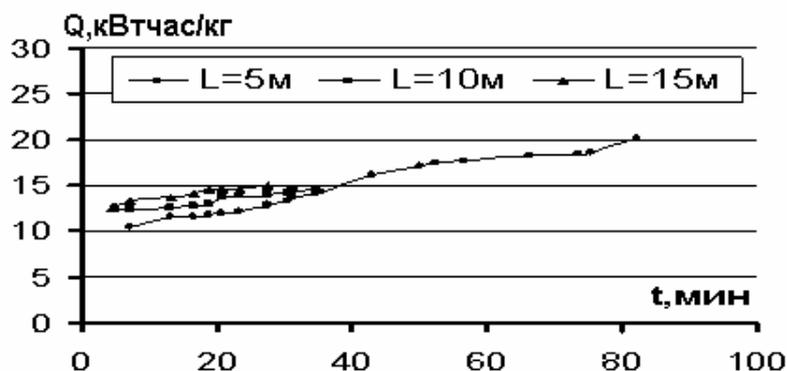


Рис.10 Зависимость энергозатрат на наработку озона от времени синтеза при  $U_{эф}=10\text{кВ}$ .

Энергетическая эффективность синтеза озона из воздуха в данном разряде сопоставима с принятыми в промышленности.

Данную установку можно использовать для обработки медицинских инструментов и семян элитных сортов сельскохозяйственных продуктов.

На основе БПР разработаны и изготовлены озонаторы на двухжильном проводе различной модификации. Озонатор бытовой- предназначен для озонирования воздуха с целью дезинфекции и дезодорации в бытовых помещениях. Нарботка озона 1г/час.

Озонатор подвесной- предназначен для уничтожения патогенной микрофлоры в общественных помещениях, овоще- и фруктохранилищах, амбарах с зерном, а также для предпосевной обработки семян и посадочного материала. Нарботка озона 5г/час.

**Выводы.** 1. БПР на двухжильном проводе отличается от классического БР наличием динамической емкости вследствие увеличения поверхности диэлектрика покрытого плазмой при повышении напряжения. Динамическая емкость насыщается при  $U_{эф}=8,5\text{кВ}$ , это обуславливает нелинейный характер статической ВАХ, и зависимости активной мощности от напряжения.

2. Развита метод определения напряжения горения разряда как функция времени. На двухжильном проводе в отличие от классического БР напряжение горения непостоянное. Найденное напряжение горения синхронно меняется с током.
3. Определены концентрация, наработка озона и энергозатраты на синтез озона на двухжильном проводе длиной  $L=5, 10, 15\text{м}$  в герметической емкости объемом  $0,2\text{м}^3$ .

Концентрация озона достигает  $C_{O_3}=4\div 5$ г/м, наработка озона  $G_{O_3}=1,3\div 2,7$  г/час, энергозатраты на синтез озона  $Q_{O_3}=10\div 20$ кВтчас/кгО в воздухе.

## Литература

1. Самойлович В.Г., Гибалов В.И., Козлов К.В. Физическая химия барьерного разряда. – М: МГУ, 1989 –176с.
2. Филиппов Ю.В., Вобликова В.А., Пантелеев В.И. Электросинтез озона. Изд.-о МГУ, 1987, -237с.
3. Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М. // Ж. физ. хим., Т.31, Вып. 4, 1957, С. 896-903.
4. Masuda S., Kiss E. // IEEE Trans Ind. Appl. – 1988 –V. 24 №2, P-223-231.
5. Энгельшт В.С., Ларькина Л.Т., Нашницын Ю.И. Способ проведения плазменно – химических реакций. Автор.свид-о СССР №1562317, 8.01.90.
6. Энгельшт В.С., Ларькина Л.Т., Нашницын Ю.И. Озонатор. Автор.свид-о СССР №1564113, 15.01.90.
7. Токарев А.В., Юданов В.А., Кель О.П., Алемский И.Н., Никульчева Т.Б. Вестник КРСУ, 2003, Т.3, №5, С.23-28.
8. Смирнова Ю.Г., Боромбаев М.К. Образование через науку. Мат. межд. научно-тех. симпозиума, КТУ им. И.Раззакова, Т.1, Бишкек, 2004, С 572-579.
9. Энгельшт В.С. Озонатор. Патент России № 17544647, 15.04.92. Бюл. № 30,15.08.92.
10. Masuda S., Kiss E. // Electrostatiks 87/ -Oxford, 8-10 April, 1987, P 243-248.
11. Боромбаев М.К., Шаршенбиев К.А., Энгельшт В.С. // Вестник КРСУ, Бишкек, 2002, Т.2. №2 –С. 53-58.
12. Шаршенбиев К.А., Усиков А.С., Боромбаев М.К. Образование через науку. Мат. межд. Научно-техн. Симпозиума КТУ им. И.Раззакова, Т. 1, Бишкек 2004, С. 273-276.
13. Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М. // Ж. физ. хим., Т.31, Вып. 7, 1957, С. 1628-1635.
14. Филиппов Ю.В., Емельянов Ю.М. // Ж. физ. хим., Т.33, №8, 1959, С. 1780-1787.
15. Йодометрический метод измерения концентрации озона. Инструкция Р5 Р-Л1-83 Ангарского филиала ОКБА.