

**Г.С. Батурова**  
**Л.А. Кипрова**

## **СПЕКТРЫ ПЛАМЕН**

Учебное пособие



Министерство образования и науки России  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«Казанский национальный исследовательский  
технологический университет»  
Кафедра технологии изделий из пиротехнических  
и композиционных материалов

Г. С. Батурова, Л. А. Кипрова

## СПЕКТРЫ ПЛАМЕН

Учебное пособие

*Под редакцией профессора И.А. Абдуллина*

Казань  
Издательство КНИТУ  
2014

УДК 680.662.1

**Батурова Г.С.**

Спектры пламен : учебное пособие / Г.С. Батурова, Л.А. Кипрова; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2014. – 208 с.

ISBN 978-5-7882-1604-1

Пособие соответствует авторскому курсу по дисциплинам «Теоретические основы горения и компоненты пиротехнических составов», «Разработка пиротехнических составов», «Пиротехнические составы, технология и изделия народнохозяйственного назначения» по направлению 240300 «Химическая технология энергонасыщенных материалов и изделий», в том числе по специальности 240304 «Технология пиротехнических средств».

Рассмотрены основные закономерности излучения пламени, типы спектров пламен.

Приведены особенности спектров пиротехнических пламен в различных диапазонах спектра и вклад в изучение пламени целевых продуктов горения. Пособие содержит обзор справочных данных по идентификации излучателей.

Предназначено для студентов, магистров, аспирантов, научных сотрудников технических вузов, занимающихся разработкой и применением пламенных источников излучения для различных диапазонов спектра.

Подготовлено на кафедре технологии изделий из пиротехнических и композиционных материалов.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Казанского национального исследовательского технологического университета

Рецензенты: заместитель директора по НИОКР ФКП «ГосНИИХП»  
д-р техн. наук, проф. *А.И. Хауринов*  
канд. техн. наук, проф. ЧПУ *С.И. Ксенофонтов*

Под редакцией профессора *И.А. Абдуллина*

ISBN 978-5-7882-1604-1

© Батурова Г.С., Кипрова Л.А., 2014

© Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2014

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	5
1.1 Основы теории спектров.....	6
2 ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛАМЕНИ.....	14
2.1 Типы спектров пламен.....	14
2.2 Природа излучения.....	15
2.3 Пламя как источник спектра.....	16
2.4 Спектр пламени.....	18
3 ТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СПЕКТРОВ В ПЛАМЕНИ.....	20
3.1 Температурные условия гетерогенных металлсодержащих пламен.....	24
4 СПЕКТРЫ ПЛАМЕН.....	30
4.1 Спектры углеводородных пламен.....	31
4.2 Спектры пламен при горении металлов.....	33
5 МОЛЕКУЛЯРНО-ИЗЛУЧАЮЩЕЕ ЦВЕТНОЕ ПЛАМЯ ПО Н. Ф/ ЖИРОВУ.....	35
5.1 Зеленое пламя.....	35
5.2 Красное, оранжевое и желтое пламя.....	40
5.3 Синее, голубое и фиолетовое пламя.....	45
6 СЕЛЕКТИВНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО ПЛАМЕНИ.....	49
7 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАМЕН СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ НИТРАТА СТРОНЦИЯ.....	56
8 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАМЕН СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ НИТРАТА БАРИЯ.....	68
8.1 Спектральные исследования пламен составов зеленого огня.....	70
8.2 Спектральные исследования пламен составов на основе сульфате кальция.....	72
9 СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ.....	74
10 СПЕКТР ПЛАМЕНИ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ.....	80
11 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПИРОПОРОХОВОГО ПЛАМЕНИ.....	82
12 УФ-СПЕКТРЫ ПЛАМЕНИ.....	86
13 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	90
13.1 Измерение длин волн.....	93
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	109
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	112
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	130
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	134

## ВВЕДЕНИЕ

Процесс горения в большинстве случаев сопровождается образованием пламени. Излучение пламени складывается из излучения образующихся промежуточных и конечных продуктов горения. Обычные химические методы исследования не применимы к высокотемпературным пламенам.

Спектральные методы исследования позволяют изучать такие высокотемпературные реакции, не нарушая и не прерывая их.

Существует три типа спектров пламени: линейчатый, полосатый и непрерывный. Спектры пламен исследуются визуальным, фотографическим, фотоэлектрическим и радиометрическим методами. В последнее время при изучении спектров пламен стали использовать принцип сканирования, то есть развертки во времени исследуемого спектра. Регистрация наблюдаемых спектров в скоростной спектроскопии производится фотографическим или фотоэлектрическим методами.

В учебном пособии рассмотрены основные закономерности излучения и образования спектров пламен. Отдельно описывается накопленный экспериментальный материал по особенностям спектров различных типов пламен.

Каждое пламя характеризуется определенным видом спектра. Вид спектра пламени определяется природой исходной горючей системы и условиями ее горения. Именно спектр излучения пламени определяет свойства пламени как источника излучения в заданной области спектра.

В пособии рассмотрены особенности различных типов пламен и вклад в излучение пламени целевых продуктов горения. Пособие содержит весьма полный обзор систематизированных справочных данных по линейчатым и полосатым спектрам наиболее вероятных продуктов горения пиротехнического пламени.

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов, бакалавров, магистров, аспирантов, научных сотрудников технических вузов, занимающихся разработкой и применением пламенных источников излучения для различных диапазонов спектра.

# 1 СПЕКТР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Качественные и количественные исследования излучения пламени проводятся в трех основных диапазонах спектра: УФ-, видимый- и ИК-диапазоны спектра (рис. 1).

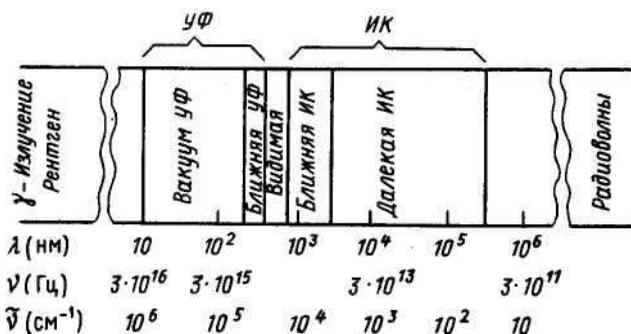


Рис. 1. Области электромагнитного спектра

Каждый диапазон спектра характеризуется длиной волны  $\lambda$  (м), частотой  $\nu$  (Гц).

## Инфракрасное излучение (ИК)

Занимает частотный диапазон  $3 \cdot 10^{11} \div 3,85 \cdot 10^{14}$  Гц ( $\lambda = 780 \text{ нм} \div 1 \text{ мм}$ ).

Видимый диапазон – единственный диапазон спектра, воспринимаемый человеческим глазом. Световые волны занимают очень узкую область: 380 – 780 нм ( $\nu = 3,85 \cdot 10^{14} \div 7,89 \cdot 10^{14}$  Гц).

Излучение, имеющее разную длину волны (частоту) в диапазоне видимого света, оказывает различное физиологическое воздействие на сетчатку человеческого глаза, вызывая ощущение цвета. Человеческий глаз различает семь цветов: красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий, фиолетовый. Диапазон длин волн электромагнитного излучения, соответствующий каждому цвету, приведен в табл. 1.

## Границы участков характерных цветов

Цвет	Интервал длин волн, Å
Фиолетовый	3970-4240
Синий	4240-4550
Голубой	4550-4920
Зеленый	4920-5650
Желтый	5650-5950
Оранжевый	5950-6400
Красный	6400-7230

Ультрафиолетовое (УФ) излучение

Занимает диапазон частот  $8 \cdot 10^{14} \div 3 \cdot 10^{16}$  Гц ( $\lambda = 10 \div 380$  нм).

Для измерения длин волны  $\lambda$  могут применяться следующие системы единиц: ангстремы Å, микроны (мкм), нанометры (нм).

$$1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ см} = 10^{-4} \text{ мкм}$$

$$1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$$

$$1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м.}$$

### 1.1 Основы теории спектров

В основе теории спектров лежат два постулата Бора. Для их осмысления необходимо определить понятие «атомной системы». Под атомной системой понимают любые микроскопические системы (атомные ядра, атомы, молекулы), а также конденсированные макроскопические системы, состоящие из взаимодействующих атомов и молекул – твердые и жидкие тела. Сами постулаты звучат следующим образом.

1. Атомная система является устойчивой лишь в определенных стационарных состояниях, соответствующих некоторой дискретной или непрерывной последовательности значений энергии  $Q$  системы.

2. Любое изменение этой энергии связано со скачкообразным переходом системы из одного стационарного состояния в другое. Переходы могут быть с излучением (оптические), когда атомная система поглощает или испускает электромагнитное излучение, либо переходы без излучения (безызлучательные переходы).

Состояние атома с определенной внутренней энергией называют

уровнем энергии. В невозбужденном атоме электроны располагаются так, что атом имеет наименьшую энергию, атом находится в основном состоянии. Под влиянием внешнего воздействия (внешнего возбуждения) электрон переходит с одного устойчивого состояния в другое состояние с увеличением запаса энергии.

Возбуждение атома может произойти при взаимодействии атома с электромагнитным полем, при непосредственном обмене энергией с другими атомами или молекулами при столкновениях, при химических реакциях. Атом может находиться только в определенных энергетических состояниях, отличающихся друг от друга на конечную величину. На рис. 1 энергетические состояния изображены горизонтальными линиями, из которых нижняя отвечает основному уровню, а остальные – возбужденным; переходы из одного состояния в другое обозначены стрелками.

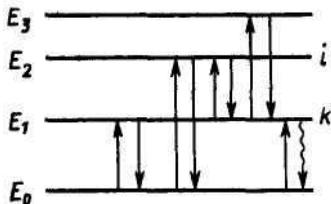


Рис. 1. Энергетические переходы в атоме

Атом не может получить или отдать любое количество энергии; энергетический обмен осуществляется квантами (фотонами) электромагнитного излучения.

При возбуждении атома внешний электрон переходит на один из более удаленных энергетических уровней, при возвращении с которого излучается квант световой энергии. Частота излучения (длина волны) испускаемого кванта определяется соотношением:

$$E_m - E_n = h\nu, \quad (1)$$

где  $E_m$  и  $E_n$  – энергия атома в возбужденном и конечном состояниях;  
 $h$  – постоянная Планка;  
 $\nu$  – частота излучения.

Абсолютная энергия квантовых состояний неизвестна, поэтому ее отсчитывают от некоторого уровня, условно принятого за нулевой, а именно от энергии ионизации, т.е. полного отрыва электрона от

атома.

Один атом за один акт поглощает или испускает только один фотон с определенной энергией (частотой). Вещество состоит из множества одинаковых атомов, способных переходить на разные энергетические уровни, испуская или поглощая фотоны разных частот. Совокупность всех фотонов одной и той же частоты составляет спектральную линию, при испускании ее называют эмиссионной, при поглощении – абсорбционной. Совокупность всех линий данного атома называют спектром вещества.

Возможны переходы между дискретными уровнями, совокупность которых дает дискретный спектр (линейчатый или полосатый). Возможны также переходы между дискретными и непрерывными уровнями, совокупность которых дает сплошной спектр. Наконец, возможны переходы и между непрерывными уровнями, совокупность которых тоже дает сплошной спектр.

Совокупность переходов с нижних уровней на верхние дает спектр поглощения, с верхних уровней на нижние – спектр испускания.

Положения линий в спектре зависит только от разницы энергетических уровней и может описываться длиной волны  $\lambda$  (мкм), частотой  $\bar{\nu}$  (Гц), волновым числом  $\nu$  ( $\text{см}^{-1}$ ). Они связаны между собой следующими соотношениями:

$$\lambda = \frac{1}{\nu}; \lambda = \frac{c}{\bar{\nu}}, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света.

Дискретные спектры могут быть двух видов: линейчатые и полосатые. Линейчатые спектры соответствуют излучению атомов. Каждый атом имеет свой строго индивидуальный спектр. Это объясняется тем, что не все переходы электронов возможны. Существуют правила отбора, по которым можно определить возможные переходы. Эти правила связаны с квантовыми числами. Например, невозможны переходы между уровнями, соответствующими разным спинам. Разрешены переходы между орбитами: s-p, p-s, p-d и т.д. В то же время запрещены переходы s-s, s-d, f-p и т.д. (рис. 2).

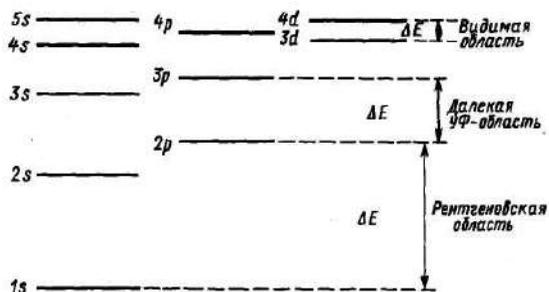


Рис. 2. Относительное расположение энергетических уровней различных квантовых состояний и изменение энергии при электронных переходах

Полосатые спектры появляются в результате излучения молекул. Большинство полосатых спектров, расположенных в видимой и ультрафиолетовой областях спектра, имеют характерную структуру. Спектр состоит обычно из ряда полос, обладающих четкими краями, или кантами, с одной стороны и затененных с другой (рис. 3-4).

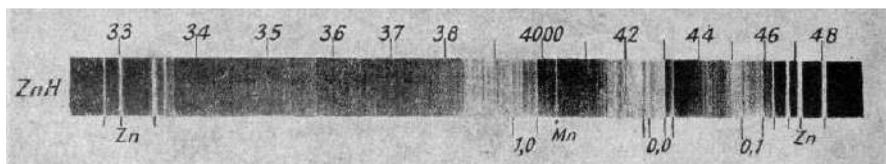


Рис. 3. Полосатый спектр молекулы ZnH с кантом в красную область

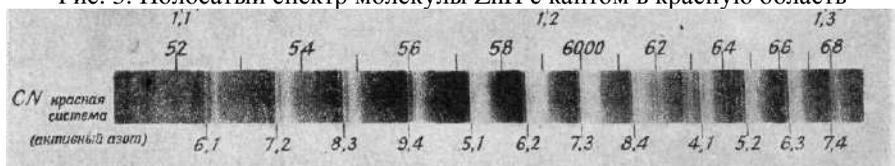


Рис. 4. Полосатый спектр молекулы CN с кантом в фиолетовую область

Если спектр исследуется с помощью прибора с высокой дисперсией, можно заметить, что каждая полоса состоит из большого числа закономерно расположенных тонких линий (рис. 5).

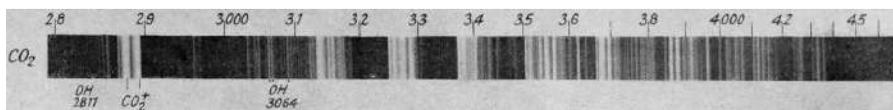


Рис. 5. Полосатый спектр молекулы  $\text{CO}_2$ , снятый при высокой дисперсии прибора

Положение системы полос в спектре определяется изменением электронной энергии, т.е. связаны электронными переходами. Молекулы обычно имеют намного меньше обнаруживаемых электронных уровней, чем атомы, поэтому в их спектрах наблюдается значительно меньше полос, чем в атомных спектрах. Часто появление полосы является следствием вращения молекулы вокруг ее центра тяжести. Каждой линии в этой полосе соответствует определенное вращательное квантовое число. При этом линии в полосе разделяются на две серии или ветви, которые называют Р- и R- ветвями. Они расходятся от начала полосы в разные стороны. У одной из этих ветвей расстояния между линиями, по мере удаления от начала полосы, уменьшаются и достигают точки поворота, соответствующей канту полосы (рис. 6).

В то время как линейчатые и полосатые спектры связаны с переходами между такими состояниями атомов и молекул, которым соответствуют определенные дискретные значения энергии, сплошные спектры в газах обусловлены переходами между состояниями, из которых по крайней мере одно не квантовано и соответствуют таким процессам, как диссоциация, ионизация или рекомбинация (ассоциация).

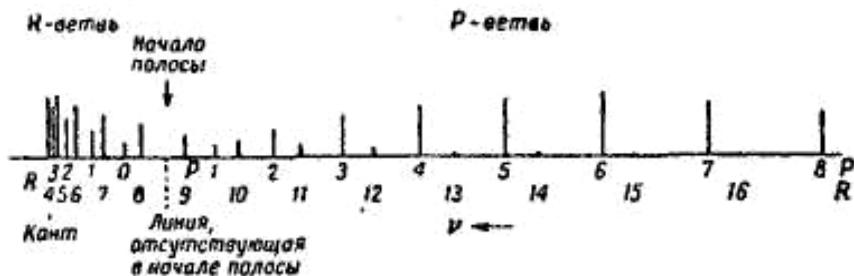


Рис. 6. Вращательная структура полосы

Таким образом, если анализ полосатых спектров позволяет судить о том, какие молекулы и радикалы существуют в условиях пламени, то изучение сплошных спектров может дать сведения о процессах, протекающих в пламенах. Путем анализа полосатых спектров можно получить точную информацию о молекулярных постоянных и идентифицировать излучаемую молекулу. В случае непрерывных спектров (их еще называют континуумами) такой подход невозможен. Процесс, обуславливающий появление континуума, может быть идентифицирован только на основании дополнительных сведений о химическом составе частиц, присутствующих в зоне горения, а также на основании данных о величине энергии, которая поглощается или излучается в ходе возможных реакций.

Молекулы веществ, находящихся в твердой и жидкой фазах, тесно связаны друг с другом. Они не могут свободно вращаться, а их колебания ограничены или связаны с колебаниями соседних молекул. Вследствие этого в спектрах веществ, находящихся в конденсированных состояниях, не наблюдается четких разрешенных полос, а имеются лишь области сплошного излучения или поглощения, которые, особенно при высоких температурах, лишены каких-либо характерных особенностей. Нужно иметь в виду, что при излучении в пламенах очень мелких частиц (менее 1 мкм), будет иметь место эффект рассеяния света на этих частицах. Наличие такого рассеяния приводит к тому, что эффективный коэффициент излучения частиц обычно возрастает с уменьшением длины волны.

Разные линии и полосы в спектре имеют разную интенсивность или яркость. Яркость каждой отдельной полосы зависит от степени заселенности исходного состояния и от вероятности соответствующего перехода. Заселенность любого энергетического уровня в свою очередь зависит от энергии данного уровня и температуры и при термодинамическом равновесии определяется распределением Максвелла-Больцмана. Согласно этому уравнению число молекул  $n_i$  в возбужденном состоянии, имеющем энергию  $Q_i$  и статистический вес  $g_i$ , связано с числом молекул в основном состоянии  $n_0$  со статистическим весом  $g_0$ , соотношением

$$n_i = n_0 \frac{g_i}{g_0} \exp\left(\frac{Q_i}{kT}\right). \quad (3)$$

Введение статистических весов обусловлено тем, что в некоторых случаях состояние может быть вырождено, т.е. может существовать несколько физических состояний, обладающих одинаковой энергией. Вероятность перехода определяется рядом факторов, в том числе относительным положением кривых потенциальной энергии молекулы в обоих электронных состояниях.

Излучение может быть спонтанным, т.е. происходящим при отсутствии воздействия внешнего излучения, и вынужденным, происходящим в результате воздействия внешнего излучения. Поглощение всегда является вынужденным. Переходы с излучением между двумя заданными уровнями энергии, верхним  $E_v$  и нижним  $E_n$ , характеризуется вероятностью спонтанного испускания, вероятностью вынужденного испускания и вероятностью поглощения.

Число  $Z_{ВН}^{ИЗЛ}$  спонтанно испущенных за единицу времени фотонов будет пропорционально заселенности  $n_v$  верхнего уровня, т.е. числу возбужденных частиц с энергией  $Q_v$ .

$$Z_{ВН}^{ИЗЛ} = A_{ВН} \cdot n_v, \quad (4)$$

где  $A_{ВН}$  – доля частиц, спонтанно испускающих фотоны частоты  $\bar{\nu}_{ВН}$  в единицу времени. Эту величину называют вероятностью спонтанного испускания или коэффициентом Эйнштейна для спонтанного испускания. Эта величина имеет размерность обратную времени.

Число  $Z_{ВН}^{ПОГЛ}$  поглощенных за единицу времени фотонов пропорционально заселенности  $n_n$  нижнего уровня и плотности излучения  $M$  данной частоты, т.е. энергии фотонов в единице объема:

$$M = N_v \cdot h \cdot \bar{\nu}, \quad (5)$$

где  $N_v$  – число фотонов частоты  $\nu_{ВН}$ ;  $h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постоянная Планка.

$$Z_{ВН}^{ПОГЛ} = B_{ВН} \cdot n_n \cdot M, \quad (6)$$

где  $B_{ВН}$  - число поглощенных в единицу времени фотонов частоты  $\bar{\nu}_{ВН}$ , рассчитанное на одну частоту с энергией  $E_n$  и на единицу плотности

излучения  $M$ . Его называют коэффициентом Эйнштейна для поглощения. Произведение  $V_{\text{НВ}} \cdot M$  равно доле частиц, поглощающих фотоны частоты  $\bar{\nu}_{\text{ВН}}$  в единицу времени и представляет собой вероятность поглощения.

Атомные системы находятся в возбужденных состояниях ограниченное время. Оно называется временем жизни возбужденных состояний и непосредственно зависит от вероятности спонтанного испускания  $A_{\text{ВН}}$

$$\tau_{\text{В}} = \frac{1}{A_{\text{В}}} = \frac{1}{\sum A_{\text{ВН}}} . \quad (7)$$

Для перевода электрона на более высокий уровень необходимо передать атому вполне определенную энергию. Ее обычно измеряют в электронвольтах и называют потенциалом возбуждения данной линии. Чем выше терм, тем больше величина потенциала его возбуждения.

## 2 ИЗЛУЧЕНИЕ ПЛАМЕНИ

### 2.1 Типы спектров пламен

Процесс горения представляет собой быстропротекающую высокоэзотермическую химическую реакцию. Химическое превращение в процессе развития влечет появление различных физических процессов массо- и теплопереноса. Возникают пламена – самоподдерживающиеся режимы горения и распространения зоны химического превращения в пространстве.

Пиротехническое пламя имеет сложную гетерогенную структуру. Пламя характеризуется наличием газовой среды, которая является не только носителем реагентов, но и обязательно в какой-то мере участвует в процессе горения. Отдельные продукты, присутствующие в пламени, обычно классифицируют на молекулы, свободные радикалы, атомы и ионы.

Состав образующихся промежуточных и конечных продуктов сгорания зависит от природы исходной горючей системы, условий горения. В процессе горения в пламени возникают и исчезают разнообразные промежуточные соединения. Эти промежуточные вещества могут обладать весьма малой продолжительностью жизни.

В пиротехническом пламени образуются промежуточные и конечные продукты сгорания в различном агрегатном состоянии: газообразные и конденсированные. Поэтому излучение пламени складывается из следующих составляющих:

- 1) собственного излучения атомов и молекул газов, образующих пламя;
- 2) собственного излучения взвешенных в пламени конденсированных частиц, являющихся продуктами сгорания;
- 3) рассеянного молекулами, атомами и твердыми частицами излучения от всех зон пламени.

Существуют три типа спектров – линейчатые, полосатые и непрерывные. Линейчатый спектр обусловлен излучением атомами газов при электронных переходах. Полосатый спектр в видимой и ультрафиолетовой областях спектра соответствует электронным переходам в молекулах газа. Полосы имеют четкие канты (рис.3-4).

Полосы в инфракрасной области (ИК) обусловлены изменением колебательной и вращательной энергии молекул.

Сплошной спектр дает излучение образующихся в пламени

конденсированных продуктов сгорания. В некоторых случаях сплошной спектр может соответствовать процессам рекомбинации, ассоциации или диссоциации продуктов сгорания.

Для получения спектра излучения присутствующих в пламени продуктов горения необходимо выполнение ряда условий. Пламя по температурным условиям должно обеспечить возбуждение атома или молекулы до нужного энергетического уровня. В высокотемпературных зонах пламени в первую очередь будут излучать атомы и молекулы, имеющие низкий потенциал возбуждения (низкая энергия перехода в возбужденное состояние). Следовательно, необходимым условием излучения является температура пламени, которая должна быть достаточной для достижения условий возбуждения рассматриваемого продукта горения.

Пиротехническое пламя относится к числу самых неоднородных гетерогенных пламен. По объему этот протяженный источник излучения характеризуется температурной и концентрационной неоднородностью, двухфазностью продуктов горения. Пиротехническое пламя излучает в широком диапазоне спектра, включающем УФ-, видимую- и ИК-области спектра. Спектры таких сложных пламен могут быть следующих видов:

- 1) пламя с преобладающим сплошным спектром (серый излучатель, состоящий из конденсированных продуктов горения);
- 2) пламя с преобладающим линейчатым или полосатым спектром (селективный излучатель)
- 3) пламя со смешанным спектром, с участками линейчатого, полосатого и сплошного спектров.

Эти пламена могут применяться как источники излучения в УФ-, видимой- и ИК-областях спектра.

## 2.2 Природа излучения

В пламенах возбуждение атомов и молекул в основном имеет тепловую или химическую природу, причем в пламенах величины энергии весьма ограничены, так что наблюдаемые спектры излучения всегда соответствуют переходам между состояниями с малой энергией. Большинство спектров пламен соответствуют переходам на основной электронный уровень.

В настоящее время в литературе считается, что значительная

часть излучения пламен может иметь химическую природу. Излучатели могут образовываться в пламени при протекании химической реакции уже в возбужденном состоянии и способны излучать без подвода энергии извне. Некоторые спектры наблюдаются в пламенах более часто, чем в других источниках. Это может быть связано с присутствием химически активных соединений, которые не существуют вне пламени в виде стабильных веществ. Если излучение пламени связано с хемилюминесценцией, то ничтожные концентрации таких частиц могут оказаться достаточными для создания интенсивного излучения, поскольку в этом случае все образующиеся частицы будут находиться в возбужденном состоянии. При тепловом возбуждении излучает лишь небольшая часть полного числа частиц данного сорта.

Если химическая реакция непосредственно приводит к образованию возбужденных атома или молекулы, то возникает аномально высокая эмиссия энергии излучения, значительно отличающаяся от эмиссии теплового излучения. В случае хемилюминесценции не изменяется область селективного излучения продуктов горения данного сорта.

### 2.3 Пламя как источник спектра

Энергия, необходимая для возбуждения атома или молекулы, называется **потенциалом** возбуждения и выражается в электрон-вольтах. Электрон-вольт – это энергия, приобретаемая электроном при прохождении в электрическом поле разности потенциалов в 1В. Энергия, приводящая к отрыву от атома его внешнего валентного электрона, называется потенциалом ионизации. Необходимую для возбуждения энергию при тепловом возбуждении частица получает в пламени.

Интенсивность излучения за 1с при переходе между двумя энергетическими состояниями  $I_{mn}$  определяется соотношением:

$$I_{mn} = N_0 \frac{g_m}{g_0} \cdot A_{mn} h \nu_{mn} e^{-\frac{E_m}{kT}}, \quad (8)$$

где  $N_0$  – концентрация частиц в нормальном состоянии;

$g_m, g_0$  – статистические веса верхнего и нормального состояний;

$E_m$  – энергия данного уровня;

$A_{mn}$  – вероятность излучения;

$h\nu_{mn}$  – энергия кванта;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – равновесная температура пламени.

Это выражение показывает, что одним из основных параметров, определяющих излучение, является **температура** источника возбуждения.

Наиболее яркими в спектре излучения являются резонансные линии, для которых верхний уровень – самый низкий по значению энергии по сравнению с другими линиями, и потенциал возбуждения имеет наименьшее значение. Например, энергия возбуждения резонансной линии натрия (689 нм) равна 2,1 эВ, а потенциал возбуждения резонансной линии магния (285,2 нм) составляет 4,34 эВ.

Самыми интенсивными системами в спектрах пламен являются системы полос таких радикалов как  $\text{CH}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{C}_2$ ,  $\text{CN}$ ,  $\text{NH}$ , поскольку у этих радикалов резонансные переходы из основных электронных состояний в нижние возбужденные состояния имеют относительно низкие энергии. Их полосы лежат в видимой или ближней ультрафиолетовой областях и могут легко возбуждаться при сравнительно низких температурах пламени. Характер наблюдаемого спектра одного и того же пламени изменяется в зависимости от исследуемой зоны пламени. Это обусловлено изменением температуры и присутствующих в выбранной зоне продуктов горения.

В пламенах были получены спектры молекулярных излучателей, которые идентифицированы как спектры молекул типа  $\text{MeO}$  или  $\text{MeOH}$ . Некоторые продукты сгорания в пламени имеют очень близкие линии и полосы излучения. Например, зеленая молекулярная полоса  $\text{CaOH}$  553,8 нм может накладываться на линию бария 553,5 нм; полоса гидроокиси стронция  $\text{SrOH}$  667,5 нм совпадает с линией лития при 670,8 нм.

По формуле (8) интенсивность спектральных линий возрастает пропорционально увеличению концентрации невозбужденных атомов  $N_0$ . Такая простая зависимость имеет место лишь при малых величинах  $N_0$ . С увеличением концентрации атомов в пламени наряду с излучением энергии возбужденными атомами заметно возрастает процесс поглощения этой энергии невозбужденными атомами этого сорта. Это явление носит название самопоглощение. Процессы

самопоглощения часто приводят к изменению самой формы и ширины спектральной линии. Края линии поглощаются в меньшей степени, чем центральная часть. При возрастании концентрации элемента центральная часть линии может быть полностью поглощена. Такая линия принимает вид дублета и называется самообращенной. Особенно сильно в пламени самопоглощаются резонансные линии элементов: Na, K, Cs.

## 2.4 Спектр пламени

В любом конкретном случае характер наблюдаемого спектра одного и того же пламени изменяется в зависимости от зоны пламени.

В табл. 2 приведены интервалы температур различных газовых пламен. Температуры горения различных смесей газов лежат в интервале 1700 – 3200°С. Но в зависимости от зоны пламени эта температура может отличаться значительно (рис. 7).

Во внутреннем конусе высокотемпературного воздушно-ацетиленового пламени легко наблюдаются молекулярные полосы CH (310-320 нм; 337-435 нм), OH (200-318, 326, 342 и 349 нм) и полосы C<sub>2</sub> – система полос Свана, располагающаяся в диапазоне от 436 до 686 нм и придающая конусу характерный голубой цвет. Также наблюдаются полосы CN (358÷389 нм) и Na (336 нм).

*Таблица 2*

### Температура некоторых пламен

Горючая смесь	Температура пламени, °С	
	измеренная	вычисленная
Светильный газ – воздух	1700-1840	1840
Карбюрированный газ – воздух	1918	–
Пропан – воздух	1925	1925
Водород – воздух	2000-2045	2115
Ацетилен – воздух	2125-2397	2250
Водород – кислород	2550-2660	2690-2780
Светильный газ – кислород	2730	2800
Пропан – кислород	–	2850
Ацетилен – кислород	3100-3137	3110

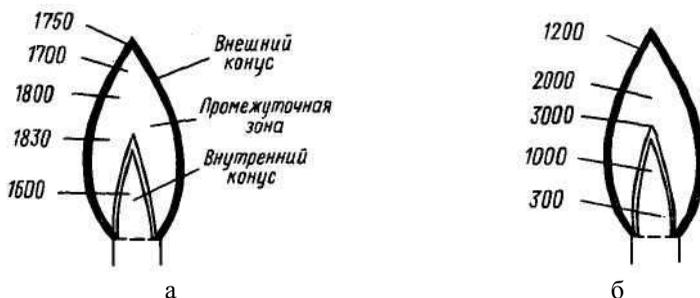


Рис. 7. Распределение температуры по зонам пламени:  
 а – пламя смеси светильного газа и воздуха;  
 б – пламя смеси ацетилена и кислорода

В газовом пламени легко возбуждаются наиболее чувствительные линии некоторых элементов, которые придают пламени характерный цвет. В табл. 3 приведены некоторые такие линии.

Таблица 3

**Длины волн спектральных линий и минимально определяемая концентрация элементов**

Элемент	Длина волны, нм	Цвет	Определяемый минимум, мкг/мл
Литий	670,0	Карминово-красный	0,2
Натрий	589,0	Желтый	0,001
Калий	769,0	Фиолетовый	0,05
Кальций	554,0	Зеленый	–
	662,0	Красный	–
	(422,7)	–	0,08
Стронций	610,0	Оранжевый	–
	655,0-688,0	Красные	–
	(группа линий и полос) (460,7)	–	0,07
Барий	553,6	Зеленый	1,0

### 3 ТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СПЕКТРОВ В ПЛАМЕНИ

В случае термического возбуждения основными факторами, определяющим интенсивность излучения линий и полос при постоянной концентрации возбужденных излучателей, являются энергия возбужденного уровня (потенциал возбуждения) и температура источника возбуждения.

На рис. 8 представлено графически, какая доля от общего числа атомов металла, вводимого в пламя, возбуждается (в зависимости от потенциала возбуждения данного спектрального перехода) для пламен с различной температурой.

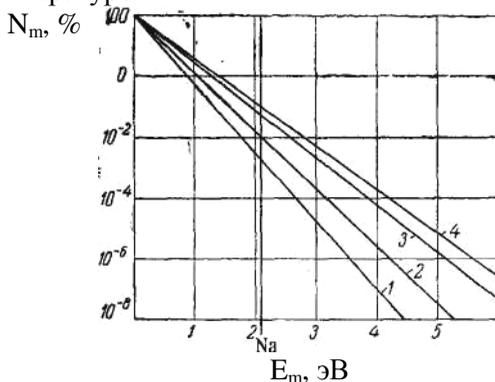


Рис. 8. Зависимость между потенциалом возбуждения  $E_m$  и числом атомов  $N_m$ , получающих энергию, равную или большую потенциала возбуждения: 1 – при 2100 К; 2 – при 2500 К; 3 – при 3000 К; 4 – при 3300 К

По оси ординат отложено относительное число возбужденных атомов (в логарифмическом масштабе), по оси абсцисс – энергия возбуждения в электрон-вольтах. Линии на графике соответствуют источникам с температурой 2100, 2500, 3000, 3300 К.

Из приведенного графика видно, что при потенциале возбуждения 2,1 эВ (резонансная линия натрия) число атомов с этой энергией при 2500 К почти на порядок больше, чем при температуре 2100 К.

Щелочноземельные металлы имеют энергию резонансного возбуждения более высокую, чем щелочные металлы:

Ca – 2,93 эВ; Sr – 2,69 эВ; Ba – 2,24 эВ; Mg – 4,34 эВ. Характерным для щелочноземельных металлов является наличие в их спектрах молекулярных полос соединений типа MeO или MeOH. Например, при наличии в пламени кальция в спектре пламени появляются полосы CaOH с максимумами излучения при 554, 600, 622 нм. В пламени также наблюдается излучение резонансной линии кальция 422,7 нм, энергия возбуждения которого 2,93 эВ. Доля возбужденных соединений из щелочноземельных металлов зависит от температуры источника возбуждения. Каждый тип пламени характеризуется определенным температурным полем. Температурные зоны создают условия для возбуждения и излучения присутствующих в этих зонах продуктов сгорания. Наиболее изучены температурные зоны в газовом пламени. Для газового пламени может наблюдаться два типа температурной неоднородности. Для газового пламени обычны два случая (рис. 9).

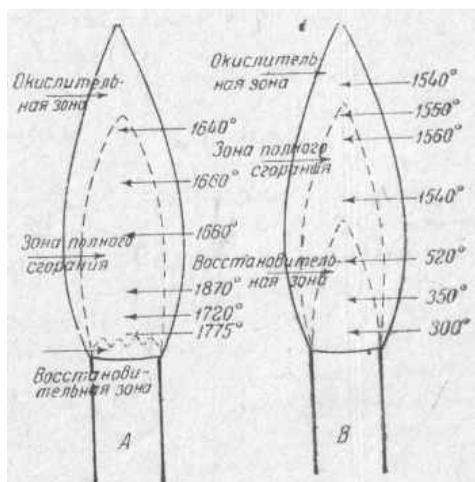


Рис. 9. Температурные зоны пламени бунзеновской горелки

В одном из них (B) процесс горения весьма близок к процессам поверхностного сгорания. Этот случай характеризуется наличием достаточно обширной и низкотемпературной восстановительной зоны. Полное сгорание происходит по сравнительно небольшой площади соприкосновения газа с воздухом (зона полного сгорания).

В другом случае (A), когда газ более тщательно смешан с воздухом, восстановительная зона сильно сжата, а зона полного

сгорания значительно расширена. Такое пламя характеризуется более высокими температурами.

Подобно этому, и в пиротехническом пламени может представиться два аналогичных случая, отвечающих полному (или активному) и недостаточному кислородным балансам состава. При недостаточном кислородном балансе характерно значительное развитие восстановительной зоны. Зона окислительная очень узка и непосредственно прилегает к тоже довольно узкой зоне полного сгорания. Расположение температурных зон может быть представлено следующим образом: внутри, в восстановительной зоне, – наиболее низкие температуры, вследствие чего преобладает молекулярное свечение; более же высокие температуры будут находиться вблизи поверхности пламени, где и происходит догорание продуктов реакции (рис. 10). Вследствие сравнительно низких температур, атомарное излучение обычно отсутствует, за исключением случаев наличия веществ, легко диссоциирующих на атомы, способные к низкотемпературному возбуждению (например, К, Na). Случай горения цветнопламенных составов.

Для более же высокотемпературных составов, полностью или почти полностью, обеспеченных кислородом для горения, распределение температурных и излучательных зон будет несколько иным (рис. 11). Как и в случае А для газа (рис. 9), восстановительная зона сильно сжата, однако, с той разницей, что она будет существовать лишь при полном кислородном балансе за счет веществ, образующихся при восстановлении окислителя до элементов. Эта зона, в отличие от предыдущего случая, будет обладать одной из наиболее высоких температур.

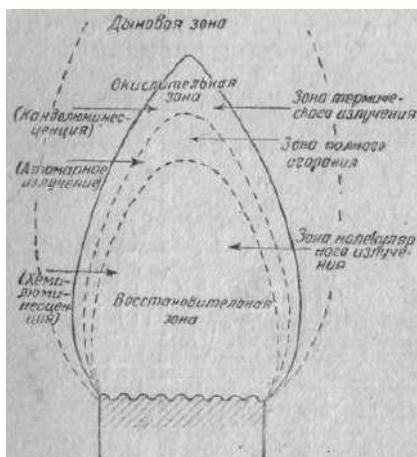


Рис. 10. Температурные зоны пиротехнического пламени с восстановительной средой

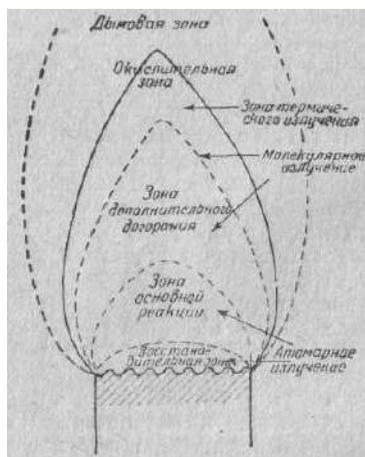


Рис. 11. Температурные зоны и зоны излучения пиротехнического пламени с полным сгоранием

Пожалуй, самые высокие температуры будут получаться, с одной стороны, у самой поверхности горения, а с другой, если в результате восстановления образуются вещества, способные к окислению за счет кислорода воздуха, в зоне, близкой к поверхности пламени. В этих высокотемпературных зонах, особенно в восстановительной, возможно существование атомарного излучения. При этом могут излучать атомы как элементов, являющихся продуктами восстановления, так и еще не успевших войти в реакцию. В более отдаленных от зоны реакции частях пламени, как в более холодных, продукты сгорания будут излучать молекулярно. И, наконец, в периферийной зоне пламени, которая в обоих случаях характеризуется, вследствие притока кислорода из воздуха, окислительными свойствами, будут излучать уже охладившиеся, твердые продукты реакции (зона термического излучения). Эта более холодная зона может существовать во всех видах пламени, у которых в конечном итоге возможно образование твердых веществ, то есть практически во всяком пиротехническом пламени.

### 3.1 Температурные условия гетерогенных металлсодержащих пламен

Температура пламени гетерогенных металлсодержащих систем зависит от механизма воспламенения и горения частиц металла. Часто связывают механизм горения и воспламенения частиц металлов с их физическими свойствами, подразделяя металлы на летучие и нелетучие. У различных металлов удаление оксидов, разделяющих металл и окислитель, происходит по-разному, что служит характерным признаком для классификации механизмов горения металла. Оксидная пленка при температуре горения может испаряться, если оксид летуч, оплавляться, если оксид легкоплавкий, растворяться в металл, если оксид растворим. Во всех случаях возможно как поверхностное, так и парофазное горение, что зависит от летучести металла.

На рис. 12 показан характер изменения температуры по высоте пламени для смесей нитрата бария и магния (летучий металл). Это яркостные температуры, полученные на пирометре ЭОП-66. Максимальная температура пламени находится у поверхности горения на расстоянии 0,5÷2,0 см от нее. Процентное содержание металлического горючего в исходной смеси определяет характер температурной неоднородности. Процесс окисления частиц металлического горючего начинается в реакционном слое конденсированной фазы, но доля окисленного там металла незначительна.

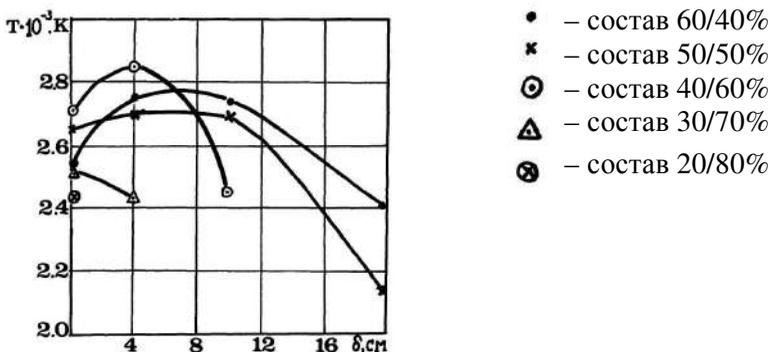


Рис. 12. Изменение температуры по высоте пламени для смесей нитрата бария и магния

Оставшиеся неокисленными частицы металла диспергируют с поверхности горения и сгорают в потоке газообразных продуктов

разложения окислителя и кислорода воздуха. Горение частиц металла в пламени и обуславливает область тепловыделения в пламени. Для двойных смесей неорганических окислителей с металлическим горючим температура пламени возрастает до своего максимального значения в газовой фазе (в непосредственной близости к поверхности горения или на небольшом удалении от нее). С увеличением процентного содержания металлического горючего в исходной смеси возрастает длина зоны максимальной температуры в пламени. Это можно объяснить тем, что чем больше металла в исходном составе, тем больше времени нужно на его полное окисление. Зона пламени, в которой происходит интенсивное окисление металла, увеличивается и возрастает длина зоны максимальной температуры. Распределение температуры по высоте пламени для двойных смесей нитрата натрия с магнием приведены на рис. 13 (фотопирометрический метод на  $\lambda=0,4$  мкм). Составы с 20 и 60% магния имеют примерно одинаковые (2500 К) максимальные яркостные температуры, а температура состава с 40% магния на 160 К выше.

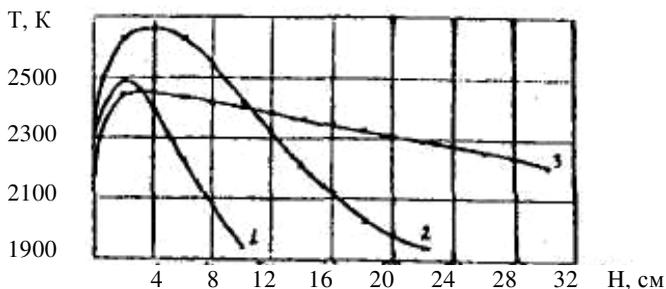


Рис. 13. Изменение температуры по высоте пламени для смесей нитрата натрия с магнием:

1 – смесь с 20% магния; 2 – смесь с 40% магния; 3 – смесь с 60% магния

Отличие по температуре пламен смесей на основе нитрата натрия с различным процентным содержанием магния зависит от местоположения выбранной зоны пламени. Характер температурных профилей аналогичен профилям пламен на основе нитрата бария.

Для двойных смесей максимальное значение температуры достигается в непосредственной близости к поверхности горения. Методом насыщенного центра спектральной линии была измерена температура пламени этих смесей в зоне, отстоящей на 2 см от поверхности горения. Полученные данные приведены в табл. 4. Температура пламени в этой зоне у смесей 40-60% магния близки и составляет 3000-3050 К.

*Таблица 4*

**Температура горения двойных смесей  
нитрат натрия-магний**

Состав, % масс.	Температура, К
80 + 20	2450
60 + 40	3050
40 + 60	3000
40 + 60	2500
70 + 30	2230
60 + 40	2400
40 + 60	2500

Наблюдаемая картина температурной неоднородности нитратно-магниевых смесей обусловлена прежде всего спецификой процесса окисления и горения частиц металлического горючего. Известно, что процесс окисления магния в газифицирующемся расплаве нитрата натрия начинается при температуре выше 673 К и значительно ускоряется при достижении температуры плавления 923 К. Количество тепла, которое выделяется при этом окислении, составляет не более 10% от общего запаса тепла в К-фазе. Наблюдаемый запас тепла и уровень температуры может быть обеспечен только при условии воспламенения определенной доли частиц магния на поверхности горения. Магний сгорает по диффузионному механизму. Вследствие горения частиц магния с образованием диффузионного фронта пламени их температура близка к температуре кипения металла (1380 К). Продукты же горения магния (твердые частицы оксида магния) имеют начальную температуру 2830 К. Этим объясняется наблюдаемая высокая температура пламени непосредственно у поверхности горения. Поскольку воспламеняется

и сгорает у поверхности только часть исходного металлического горючего, то горение протекает в условиях полного достатка окислительных элементов. Поэтому температуры у поверхности горения различных по исходному содержанию магния составов отличаются незначительно и соответствуют температуре горения частиц магния в среде кислорода. Несгоревшие на поверхности частицы магния диспергируются в пламя и догорают в высокотемпературном потоке газообразных продуктов окислителя с примесью воздуха. Концентрация этих частиц и кинетика их сгорания определяют получаемую картину изменения температуры по высоте пламени.

По механизму горения значительными специфическими особенностями отличаются частицы алюминия. «Алюминиевое солнце» (горение капли алюминия в кислороде) имеет температуру пламени в пределах 3300-3800 К. Имеющиеся литературные данные по прямому измерению температуры частиц алюминия при горении немногочисленны и противоречивы. В некоторых работах приводятся сведения, что температура зоны горения частиц алюминия при нормальном атмосферном давлении равна 3600-3850 К, то есть соответствует температуре кипения оксида алюминия 3800 К. Температура частиц алюминия в процессе горения сохранялась постоянной и равной 2170 К. Яркостная температура поверхности частиц при ее горении была равна 2090 К. Полученное значение температуры свидетельствует о том, что воспламенение происходит не в момент плавления оксидной пленки, а при нарушении ее целостности за счет напряжений в процессе нагрева частиц алюминия. Реальная температура пламени алюминий содержащих смесей намного ниже расчетной температуры горения. Это объясняется неполнотой окисления частиц алюминия, обусловленной очень плотной оксидной пленкой на частицах металла. Оксидная пленка с поверхности алюминиевых частиц удаляется не путем оплавления, испарения или растворения, а благодаря механическому разрушению в результате напряжений, возникающих из-за объемных изменений при расплавлении металла. При таком разрушении пленки не обеспечивается полнота окисления металла.

На рис. 14 приведены полученные фотопирометрическим методом температуры пламен смесей нитрата натрия с алюминием.

Максимальная яркостная температура равна 2300-2400 К. Она достигается непосредственно у поверхности горения. При удалении от нее температура резко снижается.

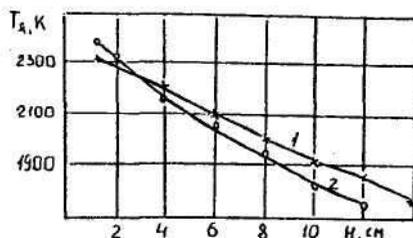


Рис. 14. Температура пламен смесей нитрата натрия с алюминием

На рис. 15 приведены температурные кривые для двойных смесей фторопласта с металлическим горючим.

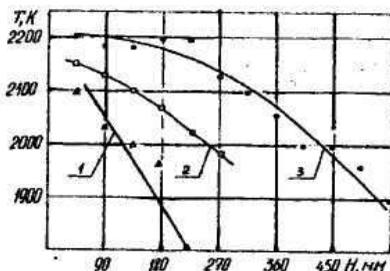


Рис. 15. Температуры пламен двойных смесей фторопласта 3 со сплавом АМ

На рисунке представлены данные для смесей фторопласта-3 (Ф-3) с различным процентным содержанием сплава АМ. Для всех рассмотренных смесей зона максимальной температуры расположена вблизи поверхности горения. В зоне, непосредственно прилегающей к поверхности горения, температуры пламен смесей с различным содержанием металлического горючего близки. С увеличением в смеси процентного содержания металлического горючего изменяется характер температурной кривой. Несгоревшие на поверхности частицы металла диспергируются в пламя и их сгорание определяет получаемую картину. При большой доле доокисляемых в пламени частиц металла на значительном удалении от поверхности все еще сохраняется высокое значение температуры,

т.е. появляется протяженная высокотемпературная зона пламени. Чем меньше в исходной смеси содержится металлического горючего, тем резче снижается температура пламени по мере удаления от поверхности горения. Таким образом, исходное количество металлического горючего влияет главным образом на характер температурной неоднородности пламени (протяженность зоны максимальной температуры).

В зависимости от назначения ПС предъявляются требования по температуре горения состава. На основании опубликованного в настоящее время экспериментального материала можно заключить, что имеется определенная связь между назначением ПС и максимальной температурой в зоне горения (табл. 5).

*Таблица 5*

**Связь температуры горения и назначением состава**

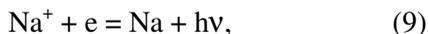
Назначение состава	Максимальная температура пламени, °С
Фотоосветительные	2500÷3500
Осветительные и трассирующие	2000÷2500
Составы сигнальных огней	1200÷2000
Зажигательные	2000÷3500
Дымовые	400÷1200
Загущенные и отвержденные горючие	800÷1200

## 4 СПЕКТРЫ ПЛАМЕН

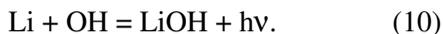
По Гейдону известно, что для пламен характерны полосатые спектры. В пламени появляются полосы с потенциалом возбуждения до 5 эВ, а наиболее интенсивные линии и полосы характеризуются потенциалом возбуждения до 3,5 эВ. В видимой и ближней ультрафиолетовой областях находятся системы полос таких радикалов, как СН, ОН, С<sub>2</sub>, CN и NH, поскольку у этих радикалов резонансные переходы из основных электронных состояний в нижние возбужденные состояния имеют относительно низкую энергию.

Исследования спектров пламен позволяют получить сведения о присутствующих в пламени промежуточных соединениях и их вкладе в общее излучение пламени.

В спектрах пламен, содержащих щелочные металлы или их соединения, присутствуют интенсивные резонансные линии этих металлов (которые могут быть и в самообращении) и интенсивный протяженный континуум. Для натрия такой интенсивный континуум наблюдается в кислородно-водородном пламени в области от 6020 до 3600Å. Эта специфика спектра натрия объясняется процессом рекомбинации ионов типа



а для лития было доказано, что его континуум обусловлен процессом типа



В этих пламенах были обнаружены полосы гидридов щелочных металлов LiH, KH, NaH. Спектры оксидов этих металлов неизвестны.

Джемс и Сагден показали, что полосатые спектры пламен, содержащих соли щелочноземельных металлов, связаны с трехатомными молекулами гидроксидов CaOH, BaOH и SrOH. Эти полосы были отделены от полос оксидов этих металлов. В спектре кислородно-водородного пламени, содержащего соли бария, присутствуют полосы BaOH, причем наиболее интенсивные из них расположены около 487,0 и 512,0 нм, а более слабые в ближней инфракрасной области. В спектре наблюдаются слабые полосы BaO, и кванты расположены при 521,4; 534,9; 549,2; 570,1; 603,9; 622,4 и 629,1 нм.

Спектры пламен, содержащих стронций, состоят из интенсивной узкой, но очень сложной полосы SrOH с максимумом

при 605,0 нм, интенсивных диффузных полос в дальней красной области (от 640,0 до 680,0 нм). Наблюдаемая в спектре этих пламен полоса 595,0 нм приписывается излучению молекулы  $\text{Sr}_2\text{O}_2$ .

Соли кальция дают интенсивные полосы излучения молекулы  $\text{CaOH}$  на 554,5 и 620,0 нм. Эти полосы наблюдаются в спектрах взрывов, в спектрах, возбуждаемых в ударных трубах. Но они не проявляются в спектре пламени окиси углерода при введении в это пламя кальция. Полосы оксида кальция могут появляться только в высокотемпературном пламени.

#### 4.1 Спектры углеводородных пламен

Основное излучение бунзеновского пламени связано с зонами пламени, где протекают быстрые химические реакции, и обусловлено нестабильными промежуточными соединениями, образующимися в процессе этих реакций. Спектр внутреннего конуса бунзеновского пламени состоит главным образом из полос  $\text{C}_2$ ,  $\text{CN}$  и  $\text{OH}$ . Обнаруженная в этих спектрах группа полос в диапазоне 280,0-420,0 нм приписывается излучению радикала  $\text{HCO}$ . На рис. 16 приведен характерный спектр углеводородного пламени в видимой области.

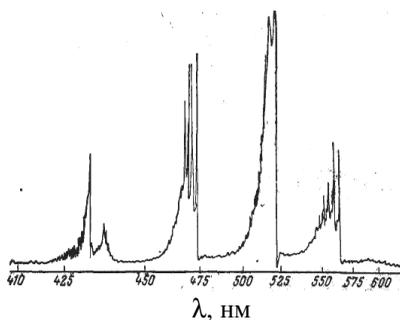


Рис. 16. Спектр излучения внутреннего конуса воздушно-ацетиленового пламени в области 410-600 нм

Излучение внешнего конуса бунзеновского пламени включает главным образом полосы радикала  $\text{OH}$  (рис. 17). Характерной особенностью этого спектра является отсутствие в нем полос  $\text{C}_2$ .

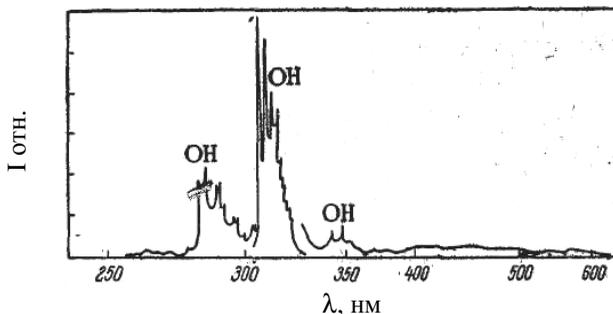


Рис. 17. Фон пламени гремучего газа. Полоса 306-330 нм записана при меньшей чувствительности прибора

Видимое излучение углеводородного пламени легче обнаруживается, но значительную часть всего излучения составляет инфракрасное излучение пламени. В инфракрасной области наиболее интенсивная инфракрасная полоса около 4,4 мкм принадлежит  $\text{CO}_2$ , а полоса в области 2,8 мкм вызвана излучением  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .

При горении веществ, содержащих азот и углерод, в спектре пламени появляются очень интенсивные фиолетовые полосы циана с серией кантов при 421,6; 388,3 и 359,0 нм. Полосы CN были обнаружены в спектре пламени светильного газа с закисью азота и при совместном сжигании в воздухе окиси углерода и аммиака. У циана есть и красная система полос, энергия возбуждения этой красной системы меньше, чем фиолетовой, но она появляется только в некоторых пламенах. Спектр радикала CN очень интенсивен в таких пламенах, в которых азот входит в состав одной из молекул горючей смеси. Полосы CN наблюдаются в спектре пламен азотсодержащих органических соединений (Приложение 1 Лист 5).

В работе В.М. Мальцева описан спектр пламени при горении нитроклетчатки и пороха «Н». В этих пламенах были обнаружены спектральные линии, отнесенные к следующим продуктам горения:  $\text{CO}_2$  (326,5 нм), CO (324,2 нм),  $\text{C}_2$  (404,2 нм), NO (394,9 нм),  $\text{H}_2$  (629,9 и 628,5 нм), CN (385,5 нм), OH (281,1 нм и 306,5 нм),  $\text{N}_2$  (375,5 нм), NH (337,0 нм) и т.д. Спектр излучения пламени претерпевает изменения по высоте пламени. У поверхности образцов наблюдается интенсивное излучение радикала OH, далее по высоте факела пламени в спектре появляются полосы В излучения радикалов CH, CN и  $\text{C}_2$ .

Излучение этих радикалов по интенсивности превышает возможное значение при термодинамическом равновесии. Авторы объясняют высокую интенсивность излучения этих радикалов хемилюминесценцией.

## 4.2 Спектры пламен при горении металлов

Одним из основных компонентов гетерогенных конденсированных систем является металлическое горючее. Продукты горения металлов обуславливают двухфазность продуктов горения в пламени и специфику их спектра излучения. Представляют интерес спектры металлосодержащих пламен различного типа.

Гейдон описывает спектр при введении в кислородно-водородное пламя солей магния. В спектре наблюдается серия простых полос средней интенсивности MgO в видимой области спектра. В ультрафиолете присутствуют две интенсивные полосы MgO 371,0 и 383,0 нм, придающие пламени фиолетовую окраску.

Спектр продуктов горения магния в кислороде описан в работе В.М. Мальцева. В спектре обнаружены линии газообразного магния и полосы MgO 372,1; 372,6; 500,7 и 520,6 нм. Эти полосы фиксируются на фоне непрерывного спектра излучения, которое создается конденсированными частицами MgO. Полосы газообразного MgO фиксируются в наиболее высокотемпературных зонах пламени. Остаются неидентифицированными несколько ярких полос в УФ-области спектра. Если предположить, что они принадлежат MgOH, то тогда в спектре обязательно обычно присутствует и полоса MgH при 521,1 нм, а эта полоса в спектре отсутствует. Тогда было сделано предположение, что интенсивные полосы в УФ-области принадлежат не MgOH, а оксиду магния в полимерной форме (MgO)<sub>n</sub>.

Меллор и Глассмен исследовали спектр при горении магния в смеси двуокиси углерода и кислорода. Спектр оказался таким же, как и вышеописанный спектр при горении магния в среде кислорода с аргоном. Не обнаружены полосы излучения CO, CO<sub>2</sub> и C<sub>2</sub>. Предполагается, что основным продуктом сгорания магния является MgO с примесью частичек углерода. Пламя смеси перхлорилфторида ClO<sub>3</sub>F и водорода было изучено с целью выяснения его пригодности для определения кальция и магния. В спектре этого пламени при введении в него металлов появляются молекулярные полосы MgCl,

MgF, CaCl, CaF и отсутствуют полосы MgO.

В спектре пламени алюминия в кислороде и в смеси кислорода с аргоном присутствуют линии Al – дублеты алюминия 308,2; 309,3; 394,4; 396,1 нм и интенсивные полосы AlO (в диапазоне 294,2÷533,7 нм). Полосы AlO свидетельствуют о диссоциации Al<sub>2</sub> O<sub>3</sub> в пламени. Полосы AlO никогда не появляются в спектрах поглощения, поэтому делается вывод, что это соединение алюминия существует только в условиях высокотемпературного пламени.

Установлено, что спектры пламени, наблюдаемые при горении алюминия в смеси двуокиси углерода и аргона, такие же, как при горении в смеси кислорода с аргоном. Эти спектры не содержат полос CO<sub>2</sub>, CO или C<sub>2</sub>.

Спектр пламени при горении циркония в кислороде содержит линии циркония, полосы ZrO: в УФ, голубая, желтая и красная система полос. Предполагают, что ZrO в пламени образуется при распаде ZrO<sub>2</sub>.

## 5 МОЛЕКУЛЯРНО-ИЗЛУЧАЮЩЕЕ ЦВЕТНОЕ ПЛАМЯ ПО Н.Ф. ЖИРОВУ

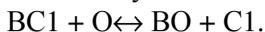
### 5.1 Зеленое пламя

Молекулярными носителями цветности, окрашивающими пламя в зеленый цвет, являются двухатомные молекулы соединений бора  $\text{BO}$  и бария:  $\text{BaO}$ ,  $\text{BaCl}$ ,  $\text{BaBr}$ ,  $\text{BaI}$ ,  $\text{BaF}$ . Из них менее обычен для пиротехнического пламени бор, хотя были попытки применения соединений бора для целей мирной пиротехники. Например, использовался состав, %:

№ 6

$\text{KClO}_3$ .....	73
$\text{S}$ .....	17
$\text{H}_3\text{BO}_3$ .....	10

Также довольно яркое желто-зеленое пламя получается при горении элементарного аморфного бора. Окрашивание пламени соединениями бора в желто-зеленый цвет общеизвестно. Однако это окрашивание вызывается не самим бором, у которого наиболее яркие линии лежат в ультрафиолете и какой по своему высокому потенциалу ионизации может быть возбужден к свечению в пламени лишь в исключительных случаях. Окрашивание происходит при введении в пламя соединений бора – боранов, галогенидов, борной кислоты. При этом образуются соответствующие двухатомные молекулы  $\text{BO}$ ,  $\text{BCl}$ ,  $\text{BF}$ ,  $\text{BBr}$  и др. Однако не все из них обладают излучением в видимой части спектра. Так, для  $\text{BCl}$  с достоверностью известны лишь ультрафиолетовые полосы в интервале  $\lambda\lambda = 292\text{-}160$  нм. Также и  $\text{BBr}$  имеет систему полос  $\lambda\lambda = 285\text{-}310$  нм., т. е. для обоих полосы лежат в ультрафиолете. Зато у  $\text{BF}$  система полос захватывает видимую часть спектра  $\lambda\lambda = 440\text{-}640$  нм. Оттенение полос у  $\text{BCl}$  и  $\text{BBr}$  – красное. Зеленое же излучение при введении соответствующих галогенидов в пламя должно быть приписано молекулам  $\text{BO}$ , образующимся при взаимодействии с кислородом воздуха



$\text{BO}$  характеризуется довольно яркими размытыми полосами. Для двух систем полос с  $\lambda\lambda = 212\text{-}365$  нм и  $\lambda\lambda = 314\text{-}582$  нм оттенение красное, для системы  $\lambda\lambda = 458\text{-}587$  нм фиолетовое. Спектр  $\text{BO}$  в пламени светильный газ + кислород состоит из полос с  $\lambda\lambda = 409, 435,$

453, 471, 492, 517, 546, 548, 570, 580 нм. Эти полосы могут быть собраны в две серии: красную  $\lambda\lambda = 687-472$  нм и более интенсивную зеленую с  $\lambda\lambda = 520 - 483$  нм. Потенциал диссоциации для  $\text{VO} = 3,06-3,76$  эВ.

Для борных соединений, присутствующих в пламени, характерен переход в  $\text{VN}$  при соприкосновении пламени с воздухом. Это объясняется большим сродством бора к азоту. Поэтому он утверждает, что в тех случаях, когда имеется к пламени доступ азота, в пламени бора, содержащем галоген, излучает не  $\text{BCl}$ , а  $\text{VN}$ . Последний имеет четыре полосы в интервале  $\lambda\lambda = 637-337$  нм.

Практическое же применение в пиротехническом зеленом пламени нашли лишь соединения бария. Из них наиболее интенсивны и наилучше изучены  $\text{BaO}$ ,  $\text{BaCl}$ ,  $\text{BaF}$ . При этом  $\text{BaO}$  дает желто-зеленую окраску пламени, а  $\text{BaCl}$  – чисто зеленую. Поэтому наибольший практический интерес представляет последнее соединение. Его удалось получить не только в пламени. Оптическим путем была для  $\text{BaCl}$  найдена теплота образования  $61$  кг·кал/моль, для  $\text{BaF} = 62$  кг·кал/моль.

Монохлорид бария имеет три системы полос, из которых зеленая  $\lambda\lambda = 505-532$  нм отненена в красную часть, остальные в фиолетовую. Зеленая система полос наиболее ярка и имеет следующие яркие максимумы:

$\lambda$ нм	$i$ в относительных единицах
524	10, 9, 5
523	5
514	10, 9, 9
513	10, 9, 8, 7, 6

Приведенные данные относятся к отдельным частям каждой полосы. Кроме того, имеются менее интенсивные полосы с  $\lambda\lambda = 532, 517, 516, 506$  нм. Наиболее же ярки полосы с  $\lambda\lambda = 524, 513$  нм. Особенно хорошо они выступают в пламени: светильный газ + кислород. В гремучем газе полосы многочисленнее,  $\lambda\lambda = 408-575$  нм, в вольтовой дуге наиболее ярки  $\lambda\lambda = 514, 517, 524, 532$  нм. Из вышеприведенного можно судить, что  $\text{BaCl}$  обладает достаточно узким спектральным максимумом излучения. Излучателем является нейтральная молекула  $\text{BaCl}$ , имеющая конфигурацию щелочного металла. Поэтому для нее характерен дуплет полос  $\lambda\lambda = 514, 524$  нм,

аналогичный дуплетам щелочных металлов. Для ВаВг  $\lambda\lambda = 536-520$  нм.

Практически, наиболее просто достигается образование ВаСl в пламени реакцией между Ва(СlО<sub>3</sub>)<sub>2</sub> и органическим горючим (молочный сахар, шеллак) или серой.

Были исследованы подобного рода составы, рецептура которых приводится ниже, %:

	№ 7	№ 8	№ 9
Ва(СlО <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> .....	80	85	80
S.....	6	5	–
Молочный сахар.....	14	–	4
Шеллак.....	–	10	–
Метальдегид.....	–	–	11
I, кд.....	6	39,6	14,1
$\frac{It}{m}, \frac{с \cdot кд}{г}$ .....	54,5	254	222
Цветность, %.....	50	60	60
m/t, г/с.....	0,11	0,15	0,07

Кривые для составов приведены на рис. 18.

Для монохлорида бария особенно ярко выражена замена галогена на кислород в окислительной атмосфере, почему начинает излучать не ВаСl, а ВаО. Этот процесс имеет положительный тепловой баланс для всех моногалогенидов щелочных земель



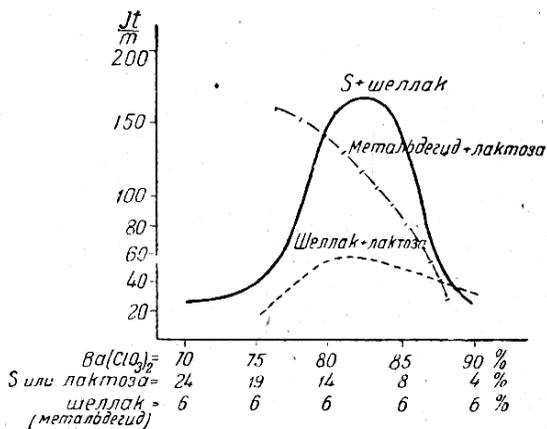


Рис. 18. Характеристики зеленопламенных бариевых составов

Для фторидов цифры такого же порядка ( $\pm 3-5$  кг-кал). Следовательно, из всех щелочноземельных монохлоридов  $BaCl$  дает наименьший тепловой эффект при обмене галогена на кислород, т. е. обладает наименьшей способностью к этому.

Из вышеприведенного видно, что внесение в окислительное пламя солей бария типа  $BaCl_2$  вызовет окраску, присущую не только одному монохлориду, но и оксиду, т. е. желто-зеленую. Это было доказано при свечении в гремучем газе. Полосы, получавшиеся при внесении  $BaCl_2$  в это пламя, исчезали в атмосфере водорода. Подобного же рода явление, но в меньшей степени, происходит и с  $BaF$  в дуге.

Одновременно с этим также происходит возбуждение некоторых линий атомарного бария, о чем будет более подробно сказано позже. Вследствие этого спектр носит сложный характер – имеет полосы и линии. Получающиеся полосы  $BaO$  занимают весь видимый спектр  $\lambda\lambda = 334-681$  нм и отненены в красную часть. В основном, изучена лишь одна система полос. Полосы сравнительно сильно размыты и имеют наиболее яркие канты со следующими коэффициентами абсорбции:

$\lambda$ , нм	k
$\zeta$ 629	1,96
$\gamma$ 602	2,03
$\eta$ 565	–
$\delta$ 549	1,99
$\iota$ 509	–
$\chi$ 487	1,98

Полоса  $\delta$  лучше всего выступает в окислительном, а  $\chi$  – в нейтральном пламени. Последняя достаточно интенсивна также и для окислительного пламени. При высоких температурах яркость полос ВаО отвечает ряду  $\gamma > \delta > \chi$ .

Наиболее устойчивые, многочисленные и достаточно интенсивные полосы дает ВаF, что вызвало применение ВаF<sub>2</sub> для пламенных вольтовых дуг. Полосы его хорошо изучены и составляют четыре системы полос с  $\lambda\lambda = 786-874, 672-773, 484-514, 365-414$  нм. Все они, исключая последнюю, отгнены в красную часть.

Группа в зеленой части состоит из полос:

	$\lambda$ , нм	$\lambda_{\max}$ , нм
C <sub>1</sub> .....	499 – 501	499
C <sub>2</sub> .....	500 – 505	500
B <sub>3</sub> .....	512 – 514	–
B <sub>2</sub> .....	495 – 496	495
B <sub>1</sub> .....	494 – 495	–
F.....	510 – 511	–

Красная система имеет полосы  $\lambda\lambda = 692-698, 691-697, 712-714, 711-714, 736-743, 736-743$  нм, но они мало интенсивны. Инфракрасная система расположена  $\lambda\lambda = 786-874$  нм. Гарвей вообще нашел до 200 полос. С увеличением давления интенсивность полос убывает. Наиболее яркие максимумы  $\lambda\lambda = 502, 499$  и  $495$  нм, т. е. свечение синезеленое.

Образование ВаF как и ВаС1 возможно лишь в восстановительной атмосфере. Было установлено, что полосатый спектр ВаF получается лишь при одновременном присутствии ВаF<sub>2</sub> и свободного металла Ва. Атом бария берет у образовавшегося ВаF лишь один валентный электрон от атома F, а второй сохраняет конфигурацию щелочного металла. В противоположность прочим

галогенидам, атом фтора при BaF не влияет на тепловой распад.

При высоких температурах начинает происходить диссоциация молекул и появляются интенсивные линии атомарного бария. Поэтому, вследствие обилия линий и полос, пламя (например, вольтовой дуги) кажется белым. При этом в дуге пламя приобретает красное ядро (эмиссия линий) и зеленую оболочку (эмиссия полос).

Для зеленопламенных составов обычно применяются в качестве носителей цветности состава окислители:  $Ba(ClO_3)_2$ ,  $Ba(NO_3)_2$ . Так как последний не обеспечивает надлежащую цветность, то в составы вводят хлорирующие вещества. В качестве таковых наиболее обычна каломель  $HgCl$  или система  $KClO_3 + S$ , о которой было сказано в начале. Следует отметить, что избыток галогена в пламени уничтожает основные полосы излучения. Так, в пламени  $H + Cl$  имеют место только ультрафиолетовые полосы и основные линии атомарного бария. Более подробно о свечении атомарного бария будет сказано в разделе о белом пламени.

## 5.2 Красное, оранжевое и желтое пламя

Как известно, соли стронция окрашивают пламя в красный цвет, а соли кальция в оранжевый. Правда, в некоторых случаях оранжевая окраска кальция неясно выражена и пламя кажется розового цвета. Это происходит, например, при горении металлического кальция. Во всех этих случаях носителями цветности пламени являются двухатомные молекулы, аналогичные бариевым соединениям:

Красное пламя ..... SrO, SrCl, SrBr, SrJ;

Оранжевое пламя ..... CaO, CaCl, CaBr, CaJ;

Желтое пламя ..... SrF, CaF.

Практически наиболее важным является пламя, образуемое на основе стронция, а именно, со свечением SrO и SrCl. Оба носителя цветности дают сходный эффект и весьма близки по своим свойствам к соответствующим соединениям бария. Так, аналогично последнему, практически при свечении SrO и SrCl также возбуждаются некоторые линии атомарного стронция, т. е. спектр фактически носит смешанный характер.

Полосы SrO отненены в красную часть, но в отличие от BaO,

сравнительно узки и имеют следующие коэффициенты абсорбции:

	$\lambda$ , нм	K
$\zeta$ .....	686 678	2,02
$\gamma$ .....	674 – 664	1,99
$\delta$ .....	650 – 643	1,96
$\alpha$ .....	611 – 601	2,00

Систем полос вообще три: красная, синяя и ультрафиолетовая. Синяя малоинтенсивна и имеет интервал  $\lambda\lambda = 530-686$  нм. Для красной наиболее интенсивны  $\lambda\lambda = 686,683, 674, 646, 627, 619,610, 606, 603$  нм. Наиболее устойчива полоса 606 нм. Красные полосы более широки, чем прочие коротковолновые. Как и для BaCl, в окислительном пламени SrO может образоваться за счет SrCl. Полосы  $\alpha, \zeta$  более устойчивы в слабовосстановительном пламени, свечение же лучше всего в нейтральном пламени. Тогда  $\alpha$ -полоса преобладает над линейчатым спектром Sr, в окислительном пламени наблюдается иногда обратное явление. При высоких температурах (например, в вольтовой дуге) полосатый спектр SrO сильно ослабляется вследствие диссоциации. Это может быть объяснено тем, что потенциал диссоциации SrO лежит в пределах 3,24-1,52 эВ, т. е. из ряда окислов VO, CaO и SrO последний имеет наиболее низкий потенциал диссоциации. Вообще для стронция характерно, что интенсивность  $\alpha$ -полосы падает в зависимости от вводимого вещества в последовательности ряда



PO<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub> слабы. Следовательно, SrO дает более оранжевое пламя при введении сульфата, чем для хлорида.

Гораздо интенсивнее и насыщеннее излучает монохлорид SrCl, имеющий две системы полос: красную с  $\lambda\lambda = 675-623$  нм с оттенением фиолетовым, и синюю с  $\lambda\lambda = 414-385$  нм оттенение которой красное. Это говорит об устойчивости молекулы, особенно красных полос. Наиболее яркие полосы SrCl имеют интенсивности по десятибалльной шкале (табл. 6).

Полосы SrCl наблюдаются выше 1000К и до 1200К, т. е. имеют узкий температурный оптимум существования. В отличие от SrO, у которого максимум лежит около 606 нм, для SrCl он более

длинноволновый и имеет  $\lambda\lambda = 674, 661, 636$  нм. Следовательно, и по цветности SrCl выгоднее SrO. В остальном SrCl весьма сходен с BaCl. Теплота образования SrCl = 55 кГ·кал/моль.

Таблица 6

**Интенсивности полос хлорида стронция**

$\lambda$ , в нм	I по Гедфельду	I по Милликену	$\lambda$ , в нм	I по Гедфельду	I по Милликену
688	–	3	648	5,5	3
674	5	10	647	5	–
666	5	–	636	10, 9, 5,5	10
662	5	–	396	–	10
661	10, 9, 8	10	393	–	10
660	6	–			

Между прочим, примечателен сдвиг максимумов полос для моно- галогенидов стронция с увеличением атомного веса аниона

$\lambda\lambda_{\max}$ , нм

SrCl..... 674, 661, 636, 396, 393

SrBr..... 680, 666, 405

SrJ ..... 701, 693, 685, 441

т. е. с увеличением атомного веса галогена все полосы SrX передвигаются в длинноволновую часть спектра. Наиболее эффективен состав красного огня, следующей рецептуры, %:

KClO<sub>3</sub>..... 65,5

SrC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>..... 17

Молочный сахар..... 10,5

Шеллак..... 7

Для него были получены следующие показатели: I = 14,4 кд, It/m=132 с·кд/г, m/t = 0,10 г/с. Цветность состава не определялась.

Кальциевое пламя вследствие того, что имеет цветность, среднюю между натровым и стронциевым, применяется в сравнительно редких случаях. Оно тоже весьма сходно с бариевым и стронциевым пламенем, в первую очередь, в отношении смешанного возбуждения. Оксид кальция имеет три системы полос – одну красную и две сине-ультрафиолетовые. У всех оттенков в красную часть спектра. В табл. 7 указаны коэффициенты абсорбции.

Таблица 7

**Коэффициенты абсорбции**

Полосы	$\lambda$ , нм	k
$\epsilon$	650 – 638	1,99
$\alpha$	628 – 616	1,98
$\delta$	607 – 597	1,97
$\beta$	557 – 551	2,01

Все полосы хороши в нейтральном пламени, в окислительном устойчивы в следующей последовательности  $\delta > \epsilon > \beta > \alpha$  линейчатого спектра.  $\alpha$ -полоса в смысле зависимости от аниона соли обладает тождественными характеристиками, как и для SrO. Имеются три системы  $\lambda\lambda = 400-323$  нм 460-387 нм, 655-605 нм отвечают потенциалу диссоциации 3,03-4,56 эВ, где синяя система достаточно интенсивна, имея  $\lambda\lambda_{\max} = 408, 420, 434$  нм.

Монохлорид кальция CaCl, как и все монохлориды, более интенсивен, чем CaO, но тоже имеет три системы полос: красную  $\lambda\lambda = 604-636$  нм, оранжевую  $\lambda\lambda = 581-607$  нм и синюю  $\lambda\lambda = 564-402$  нм. Наиболее интенсивные полосы по десятибалльной шкале представлены в табл. 8.

Таблица 8

**Интенсивности полос хлорида кальция**

	$\lambda$ , нм	I		$\lambda$ , нм	I
	Красная система	636		5	Оранжевая система
633		5	594	10, 10, 9, 8	
622		5	593	10, 10	
621		10, 9, 8, 6			
620		5			
618		10, 9, 8, 6			

Отсюда максимумы яркости приходятся на  $\lambda\lambda_{\max} = 621, 618, 594, 593$  нм. Особенно ярки последние. Красные полосы отненены к красной части, а оранжевые – к фиолетовой. Теплота образования CaCl = 52 кал/моль.

Из анализа полосатых спектров становится ясным поведение кальция в различном пиротехническом пламени, вызывающее

появление разных оттенков. Так, розовые оттенки (например, горение Ca, диссоциация  $\text{CaCO}_3$ ) вызываются красными полосами CaO, оранжевые тона – преобладанием и большей интенсивностью оранжевых полос CaCl. Наконец, при более высоких температурах возможно появление фиолетовых оттенков, на что указывают некоторые пиротехники, вследствие интенсивного излучения синей системы CaO и фиолетовых линий атомарного кальция.

Близкими к кальцию являются по своему излучению монофториды CaF и SrF. Последний окрашивает восстановительное пламя в желтый цвет, а окислительное – в красный. В этом случае происходит аналогично BaCl обмен фтора на кислород и появление свечения SrO·SrF имеет три системы полос – оранжевую  $\lambda\lambda = 628-687$  нм, желто-зеленую  $\lambda\lambda = 577-562$  нм и ультрафиолетовую  $\lambda\lambda = 365-371$  нм. Полосы отненены частью в красную сторону, частью в фиолетовую. В красной системе известны следующие полосы  $\lambda\lambda = 687-677$  нм, 674-668 нм, 665-663 нм, 666-658 нм, 651-623 нм, 642-639 нм, 633-632 нм, 631-628 нм. Приведены максимумы этих полос:

$\lambda = 651$  нм,  $\lambda = 652$  нм,  $\lambda = 663$  нм,  $\lambda = 578$  нм.

Наиболее интенсивны  $\lambda\lambda = 663, 651, 577, 364$  нм. По своим прочим свойствам SrF аналогичен BaF. Теплота образования SrF  $\approx 60$  кг-кал/моль.

Монофторид кальция имеет три системы полос: оранжевую  $\lambda\lambda = 630-580$  нм, зеленую  $\lambda\lambda = 530-510$  нм и ультрафиолетовую  $\lambda\lambda = 335-352$  нм. Оттенение аналогично SrF. За исключением MgF, имеющего только две ультрафиолетовые системы полос, CaF из всех монофторидов, излучающих в видимой части спектра, наиболее устойчив при высоких температурах. Устойчивость RF, видимо, обратно пропорциональна атомному весу металла, т. е.



и также  $\text{RF} > \text{RC1} > \text{RBr} > \text{RI}$ .

CaF имеет такие максимумы:

$\lambda_1 = 606$  нм,  $\lambda_2 = 605$  нм,  $\lambda_3 = 604$  нм,  $\lambda_4 = 583$  нм,  $\lambda_5 = 529$  нм,  $\lambda_6 = 529$  нм

Другие данные –  $\lambda\lambda_{\text{max}} = 630, 616, 609, 606, 586, 585, 529$  нм. Самая яркая – последняя 529 нм. Теплота образования CaF = 57 кг-кал/моль, для MgF = 30 кг-кал/моль, MgCl = 18 кг-кал/моль. Следовательно, теплоты образования моногалогенидов растут с

увеличением атомного веса металла и уменьшением атомного веса галогена. Все монофториды щелочных земель (CaF, SrF, BaF), получаемые в результате диссоциации  $RF_2$ , являются причиной усиления световой отдачи пламенных вольтовых дуг, куда они и вводятся с этой целью.

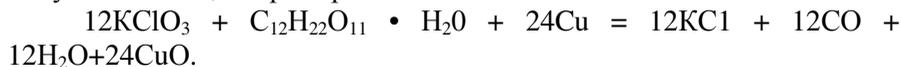
### 5.3 Синее, голубое и фиолетовое пламя

Из синего пламени наиболее ярким является пламя с участием меди. Медь в пламени дает два рода окрасок — синюю и зеленую. Ряд исследователей указывает, что род окраски зависит от природы пламени, в котором носителями цветности являются молекулы  $CuO$  и  $CuCl$ . При этом твердо установлено, что синяя окраска вызывается наличием  $CuCl$ . Поэтому для образования синего пламени будут благоприятны все те процессы, которые способствуют образованию хлора. Наоборот, процессы, не дающие хлора, будут вызывать появление зеленого пламени. В качестве примера первого процесса приводится реакция горения хлората калия с серой и медью:

$2KClO_3 + 2S + Cu \rightarrow K_2SO_4 + CuCl_2 + SO_2$ . Получающийся  $CuCl_2$  уже при низких температурах ( $t > 300^\circ$ ) диссоциирует:



Если же серу заменить на органическое горючее (углевод, смолу), то реакция не будет давать хлора, и вместо  $CuCl_2$  будет получаться  $CuO$ , например:



В последнем случае пламя получается зеленым и для синего пламени необходимо введение дополнительных веществ, развивающих хлор, например  $NH_4Cl$ . Помимо химизма процесса, еще также оказывает влияние и температура пламени. Влияние этих всех моментов заключается в том, что зеленая окраска появляется только во внешней окислительной части пламени, особенно в присутствии значительных количеств водорода или органических веществ. Низкие температуры и избыток хлора дают только спектр  $CuCl$ , в то время как высокие температуры, недостаток хлора и увеличение количества кислорода сначала вызывают появление смешанного спектра  $CuCl + CuO$ , а затем чистого спектра  $CuO$ , при особо высоких температурах сопровождаемого линиями атомарной меди. Это вызывается тем

обстоятельством, что обычная для монохлоридов реакция с кислородом особенно гладко протекает для меди:



Вследствие близости теплот образования  $\text{CuCl}$  (35,4 кж·кал/моль) и  $\text{CuO}$  (39,7 кж·кал/моль) при высоких температурах устанавливается равновесие, очень чувствительное к малейшим внешним воздействиям. Далее,  $\text{CuO}$  как обладающая малым тепловым эффектом образования, будет легко диссоциировать при высоких температурах на  $\text{Cu}$  и  $\text{O}$ .

Для того чтобы более точно разобраться в сложных процессах свечения медного пламени, необходимо ознакомиться со свойствами  $\text{CuCl}$  и  $\text{CuO}$  как носителей цветности. Последняя имеет три системы полос, оттененных к красному:

Система полос	$\lambda$ в нм
Красная	629—605
Зеленая	560—520
Синяя	446—428

В зависимости от температурных условий, преобладает в излучении та или иная система полос. При достаточно низких температурах вообще процесс  $\text{CuCl} + \text{O} \leftrightarrow \text{CuO} + \text{Cl}$  идет слева направо, и при этом более интенсивно начинают излучать красные полосы  $\text{CuO}$ . Поэтому, при очень низких температурах в медном пламени начинает преобладать излучение  $\text{CuO}$  с красноватым оттенком пламени. Николаев указывает, что в этом случае пламя становится фиолетовым или даже красным, и приводит следующие рецептуры (в процентах) для пламени с красноватыми краями

	1	2
$\text{KNO}_3$ .....	39	37
$\text{KClO}_3$ .....	26	30
S .....	25	24
$\text{CuO}$ .....	10	9

Основным же носителем цветности для синего пламени является  $\text{CuCl}$ . Спектр последнего весьма сложен и состоит из одной зеленой и четырех сине-фиолетовых систем полос:

.....	$\lambda$ в нм
A .....	538—510
B.....	498—480
C.....	495—475
D .....	443—435
E.....	441—425

Из системы зеленых полос наиболее интенсивны с  $\lambda_{\max} = 549, 540, 527$  нм. Синие же полосы, вообще расположенные в интервале  $\lambda = 498-390$  нм, являются в нормальных условиях самыми яркими. Из них особенно выделяются следующие (табл. 9).

Таблица 9

**Интенсивности полос в синей области спектра**

$\lambda$ , нм	I	$\lambda$ , нм	I
495	2	435	5
488	5, 3	433	7
485	5, 3, 2	429	3, 2
479	2	423	2
476	2, 2, 2	422	3, 2
443	3	419	3, 3
442	3, 2	413	2, 2
436	2	412	2, 2
436	2	412	2, 2

Отсюда видно, что в интервале  $\lambda = 495-412$  нм спектр сильно насыщен полосами, из которых наиболее яркие 433, 435 и 485 нм.

Следовательно, оттенок пламени при достаточной его насыщенности  $\text{CuCl}$  будет фиолетовый. Потенциал диссоциации сравнительно низок и лежит в пределе 2,36-3,14 эВ.

Аналогичные спектры дают и другие моногалогениды меди —  $\text{CuF}$ ,  $\text{CuBr}$ ,  $\text{CuI}$ . Все они, как и  $\text{CuCl}$ , отненены в красную часть спектра. Наиболее интенсивные полосы их показаны в табл. 10.

## Полосы моногалогенидов меди

$\lambda$ , нм Система	CuF	CuBr	CuJ
A	569	495, 487, 481	514, 507, 502
B	506, 490	440, 434, 429	465, 460, 455
C	493, 478	443, 426, 421	463, 457, 453
D	–	–	441, 436, 432
E	–	–	421, 417, 413

Из этих данных можно судить, что в ряду моногалогенидов меди наиболее чистое синее свечение следует ожидать у CuBr.

Для свечения в пламени моногалогенидов меди существует узкий температурный интервал для синих и зеленых полос (табл. 11).

Таблица 11

## Температурный интервал моногалогенидов меди

Температура появления	CuCl	CuBr	CuJ
синих полос	< 840K	<840K	<840K
зеленых полос	~ 1000K	~950K	– 900K

Следовательно, медное пламя очень чувствительно к изменениям температур и держится в узких температурных интервалах. Помимо этого синее медное пламя очень чувствительно к примесям. Например, достаточно 1/500 натрия для того, чтобы пламя стало грязно-желтым.

## 6 СЕЛЕКТИВНЫЕ ИЗЛУЧАТЕЛИ ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО ПЛАМЕНИ

Цвет пиротехнического пламени обеспечивается селективным излучением некоторых газообразных продуктов сгорания. Полосы излучения этих продуктов приходятся на заданный диапазон спектра. Доля этого излучения в общем излучении пламени зависит от условий возбуждения в пламени, концентрации этих продуктов и их устойчивости в условиях пламени. Температура пламени не должна превышать температуру диссоциации основных селективных излучателей. Доля излучения каждого продукта в общем излучении пламени при одинаковой концентрации излучателей может быть различной из-за разной интенсивности сравниваемых селективных полос излучения. В настоящее время нет единых представлений о формировании цвета пламени.

Большинство авторов среди целевых продуктов сгорания составов красного огня предпочтение отдают монохлориду стронция, вклад других вероятных селективных излучателей обычно не рассматривается. Однако анализ справочных спектральных данных показывает, что в красной области спектра расположены интенсивные полосы излучения трехатомной молекулы SrOH. В последнее время в литературе рассматривается вопрос возможного селективного излучения этой молекулы и ее вклад в цвет пламени. Молекулы SrCl и SrOH характеризуются очень близкими значениями потенциала возбуждения (~ 4,2 эВ). Если сравнивать эти продукты по энергии разрыва связей (по энергии диссоциации), то по имеющимся справочным данным эти энергии близки (табл. 12).

Таблица 12

### Энергия диссоциации SrCl и SrOH

Реакция диссоциации	Энергия диссоциации, кДж/моль
$\text{SrCl} \rightarrow \text{Sr} + \text{Cl}$	399,61
$\text{SrOH} \rightarrow \text{Sr} + \text{OH}$	386,20
$\text{SrOH} \rightarrow \text{SrO} + \text{H}$	376,20

Таким образом, вероятность их наличия в пламени одинакова при определенных температурных условиях. Поэтому вклад SrCl и SrOH в общее излучение пламени будет зависеть от концентрации этих молекул в излучающей зоне пламени. Если же они присутствуют

в равных долях, то по оптическому показателю поглощения молекулы SrCl и соответственно по величине излучаемой в полосах энергии излучения значительно уступают трехатомной молекуле SrOH.

Интенсивность излучения полосы с ростом концентрации увеличивается до определенного предела, пока в максимуме полосы не наступит насыщение. Это насыщение ограничивается законами АЧТ, далее может наступить явление самопоглощения в этой полосе.

Вклад продуктов сгорания в излучение пламени зависит от его типа спектра в заданном диапазоне, количества интенсивных полос, а также их интенсивности. Известно, что интенсивность линии и полосы зависит от концентрации излучающих молекул, температуры горения и потенциала возбуждения этой молекулы:

$$I = A \cdot c \cdot e^{-\frac{E}{kT}}, \quad (11)$$

где  $A$  – спектральная константа данной молекулы;

$c$  – концентрация излучателей в источнике;

$T$  – температура источника;

$E$  – потенциал возбуждения молекулы данного сорта,

$k$  – постоянная Больцмана.

Каждая полоса имеет потенциальное значение максимальной интенсивности при данной температуре источника. В соответствии с зависимостью ( ) интенсивность полосы должна изменяться линейно с ростом концентрации излучателей в источнике. Но линейная зависимость существует до определенного предела. При значительной концентрации молекул в пламени может начаться процесс поглощения молекул невозбужденными молекулами. Это явление называется самопоглощением. Явление самопоглощения наблюдается во всех пламенах. Температурная неоднородность пламени, его объемная протяженность обуславливают присутствие в пламени значительной доли невозбужденных молекул данного сорта. Вследствие самопоглощения начинает изменяться форма спектральной полосы. Наибольшему самопоглощению подвергнут центр спектральной полосы. Центр линии достигает насыщения при определенной концентрации молекул, а затем в результате процесса самопоглощения интенсивность полосы в ее центре начинает снижаться. При дальнейшем увеличении концентрации в присутствии в более холодных зонах пламени невозбужденных молекул может наступить самообращение полосы. Полоса (или линия) становится

похожа на дублет. Излучают только крылья полосы, в центре излучение отсутствует. Самопоглощение в пламени присуще в определенной степени всем полосам излучения, что накладывает определенное ограничение на варьирование концентрацией излучателя и размеров пламени. Самообращению подвергнуты чаще всего резонансные линии и полосы с низкими потенциалами возбуждения Na, K, Cs. Примеры спектра поглощения натрия приведены на рис. 19-21.

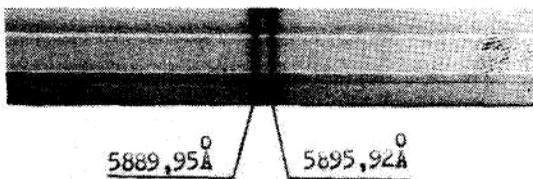


Рис. 19. Спектр поглощения дублета натрия

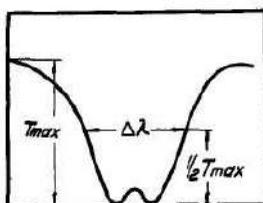


Рис. 20. Контур поглощения дублета натрия:  
 $T_{\max}$  - максимальный коэффициент поглощения;  
 $\Delta\lambda$  - полуширина контура поглощения

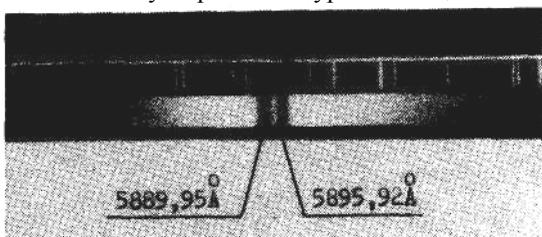


Рис. 21. Спектр излучения пламени в районе резонансного дублета натрия

Следует отметить, что программа термодинамического расчета

учитывает диссоциацию продуктов горения в условиях пламени. Термодинамический расчет позволяет провести сравнительный анализ расчетной доли целевых продуктов сгорания в этих составах. Так, например, полученные данные для состава на основе хлорида аммония (ПАМ,  $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$  и идитолы) показывают, что при температуре 2200 – 2500 К в продуктах сгорания содержатся и  $\text{SrCl}$ , и  $\text{SrOH}$ , следовательно, температура диссоциаций этих соединений лежит в пределах температуры пламени, что не соответствует принятым литературным значениям 1500-1800 К. Доля основных излучателей в продуктах сгорания при увеличении процента хлорирующей добавки изменяется по-разному: доля  $\text{SrCl}$  в зависимости от процентного содержания хлорирующей добавки может увеличиваться в 1,5 раза, а содержание  $\text{SrOH}$  проходит через минимум. Интересно заметить, что этот минимум соответствует 8% хлорида аммония в составе, т.е. минимум  $\text{SrCl}$  и максимум  $\text{SrOH}$  совпадают (рис. 22).

Кроме того, в продуктах сгорания присутствует сложное соединение  $\text{SrOHCl}$ , которое в различных зонах пламени (в зависимости от существующих условий, а именно температуры и состава продуктов сгорания) может разлагаться по разной схеме, давая дополнительно селективные излучатели. Количество  $\text{SrOHCl}$  намного превышает (~ в 1,5 раза) долю  $\text{SrOH}$  и остается неизменным при изменении содержания хлорида аммония.

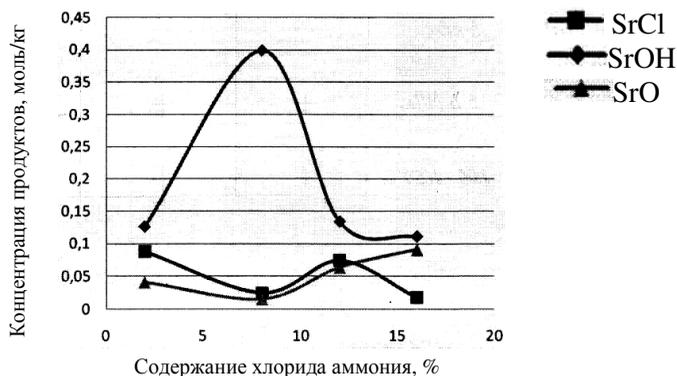


Рис. 22. Влияние содержания хлорида аммония на концентрацию продуктов пламени

Присутствие в продуктах сгорания соединений  $\text{SrCl}_2$  и  $\text{Sr}(\text{OH})_2$  также дополнительно увеличивает концентрацию селективных излучателей, участвующих в образовании цвета пламени. Горение пиротехнического состава цветного огня протекает при атмосферных условиях с участием кислорода воздуха. Степень участия воздуха в горении должна сказываться на реальном значении температуры пламени и составе продуктов сгорания. Составы красного огня имеют отрицательный кислородный баланс, поэтому диффузия воздуха может охлаждать пламя и разбавлять концентрацию целевых продуктов сгорания. На рис. 23 показано влияние коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  на параметры горения различных составов красного огня на основе ПВХ.

Из рисунка видно, что при увеличении доли воздуха концентрация основных излучателей уменьшается. Учитывая, что для большинства пиротехнических пламен коэффициент участия воздуха составляет 0,3, концентрация излучателей в пламени может составлять 0,7 — 0,8 моль/кг. Кроме того, поскольку доля воздуха увеличивается от ядра пламени к периферии, то концентрация излучателей уменьшается по направлению от ядра пламени к его краям.

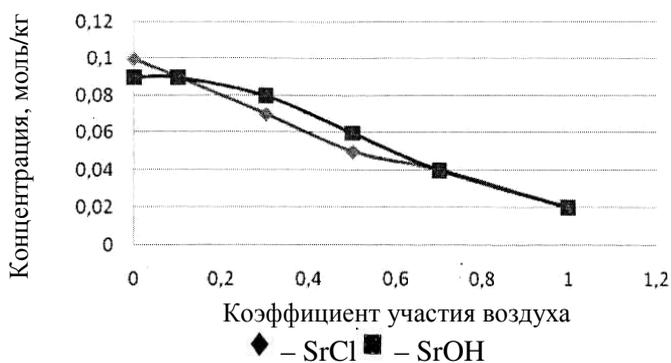


Рис. 23. Влияние воздуха на концентрацию основных излучателей

Для рассматриваемых систем были приведены спектральные исследования в видимой области спектра. На полученных спектрах фиксируются полосы излучения  $\text{SrCl}$ ,  $\text{SrOH}$ , что доказывает присутствие газообразной молекулы  $\text{SrOH}$  и ее вклад в излучение пламени в красной области (температура пламени 2300 – 2500 К).

Следует отметить, что в работе Douđa V.E. указываются случаи влияния или полного подавления излучения молекул, участвующих в этом процессе, третьим телом. Например, присутствие в пламени С1 (третьего тела) способствует реакции образования гидроксида стронция  $\text{SrO} + \text{H} + \text{C1} \rightarrow \text{SrOH} + \text{C1}$ .

Высокотемпературное пламя создает условия диссоциации продуктов горения. Douđa V.E. считает, что при температуре 2500 К более предпочтительными соединениями стронция являются SrO и SrOH. Сохранность молекул SrCl маловероятна. Однако расчет с учетом диссоциации показывает ее наличие. В полученных спектрах фиксируется наличие излучения молекулы SrOH также в условиях высокотемпературного безметалльного пламени.

Полученные экспериментальные данные показывают, что присутствие в пламени продуктов окисления металлического горючего и возможные процессы доокисления металла в пламени не приводят к гашению излучения этих полос. Подавление излучения молекулы SrOH не наблюдается и в пламени смесей, где произведена частичная замена хлорирующей добавки ПВХ на кислородосодержащую органическую добавку с целью увеличения доли SrOH в продуктах сгорания. Эти данные говорят о том, что селективное излучение газообразной молекулы SrOH может обеспечивать окраску пламени при высоких температурах горения.

Интересно рассмотреть вероятность излучения молекулы SrOH при еще более высокой температуре пламени, которая намного превышает температуру диссоциации этой молекулы. В качестве высокотемпературной среды выбрано пламя состава цветного огня на основе баллиститного пороха с температурой горения 3000 К.

Таким образом, можно заключить, что данный селективный излучатель работает и в условиях высокотемпературного пламени, обеспечивая требуемый цвет пламени. Подтверждением этого являются результаты исследований, проведенных авторами работы. В пламенах, образованные при сгорании полибутадиена с концевыми гидроксильными группами, наполненного кристаллогидратами хлорида стронция  $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , не обнаружено присутствие монохлорида стронция. Спектр пламени приведен на рис. 24, на котором видно, что интенсивность полосы SrOH достаточно высока.

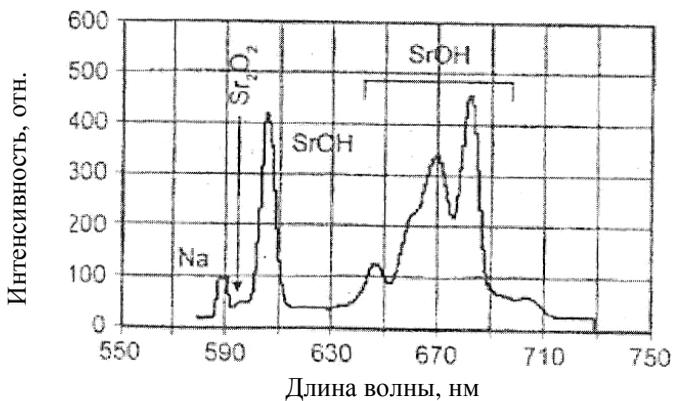


Рис. 24. Распределение энергии по спектру для состава полибутадиен-кристаллогидрат хлорида стронция

Установленный факт еще раз подтверждает предположение о том, что SrOH более вероятен при формировании цвета пламени и является термически устойчивым по сравнению с монохлоридом стронция.

## 7 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАМЕН СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ НИТРАТА СТРОНЦИЯ

Двойная смесь нитрата стронция является основой сигнальных составов. Была взята смесь 82% нитрата стронция и 18% магния. Спектральный составов продуктов горения этой смеси приведен в табл. 13.

*Таблица 13*

### Излучатели пламен составов цветных огней на основе пироксилина

Излучатель	Длина волны, в Å, измер.	Длина волны, в Å, отожд.	Потенциалы возбужд., эВ
Интенсивная полоса SrOH	6820M	6820M	–
Серия полос чередующейся интенсивности SrOH	6590M 6400M	6590M 6400M	1,35
Широкая полоса SrOH	6050M	6050M	10
Очень яркий дублет линий Na	5895 5890	5899,5 5995,9	2,10 2,11
Слабые линии Sr Mg	4607 4572	4607,3 4571,1	2,63 2,63

Спектр пламени двойной смеси на основе нитрата стронция характеризуется наличием полос оксида и моногидрата стронция, некоторые из которых имеют достаточно высокую интенсивность и вполне могут обуславливать окраску пламени при горении состава. Спектр пламени этой смеси отличается небольшим количеством линий магния и стронция, что свидетельствует о низкой температуре пламени, которая недостаточна для возбуждения линий с более высоким потенциалом возбуждения.

Излучение атомарного стронция приходится на

коротковолновую область спектра и поэтому не может быть использовано для получения окрашенного пламени. Пламя, получающееся при излучении оксида стронция, имеет розовую окраску, так как вследствие его малой летучести (выше  $2500^{\circ}\text{C}$ ) создать в пламени значительную концентрацию паров оксида стронция трудно.

Введение в сигнальные составы хлорсодержащих компонентов приводит к резкому улучшению окраски пламени при определенных условиях. В этом случае в пламени ожидается появление монохлорида стронция, который считается основным источником красного цвета пламени сигнальных составов.

По мнению большинства авторов, составы цветных огней выгодно создавать с отрицательным кислородным балансом, так как наличие в пламени восстановительной атмосферы препятствует окислению монохлоридов в оксиды и способствует увеличению чистоты цвета пламени. Избыток свободного хлора в пламени сдвигает равновесие реакции влево и тем самым способствует улучшению цвета пламени. Поэтому представляло интерес выяснить влияние природы и количества хлорсодержащего компонента на состав продуктов сгорания и чистоту цвета пламени. Для исследования были выбраны два типа составов: в первой группе в качестве окислителя и цветопламенной добавки – нитрат стронция, в качестве хлорсодержащего компонента – поливинилхлорид; во второй группе составов в качестве окислителя и хлорсодержащего компонента применялся перхлорат аммония, цветопламенной добавкой служил нитрат стронция.

При введении в двойную смесь нитрат стронция + магний поливинилхлорида наблюдается улучшение цвета пламени.

Существует оптимальное содержание поливинилхлорида, которое обуславливает насыщенный красный цвет пламени при горении состава. Если увеличивать содержание поливинилхлорида более 30%, то наблюдается ухудшение насыщенности пламени красным цветом, при дальнейшем увеличении ПВХ цвет становится грязно-желтым. В пламени появляется все большая доля неокисленного углерода, о чем говорит образование дыма при

горении. Раскаленные частички углерода обуславливают усиление сплошного излучения пламени, что приводит к разбавлению цвета, даваемого основными селективными излучателями.

На рис. 25 показан характер изменения скорости горения, температуры пламени и насыщенности пламени цветом при введении в двойную смесь  $Sr(NO_3)_2+Mg$  поливинилхлорида за счет окислителя. Улучшение цветового тона составов соответствует снижению температур пламени.

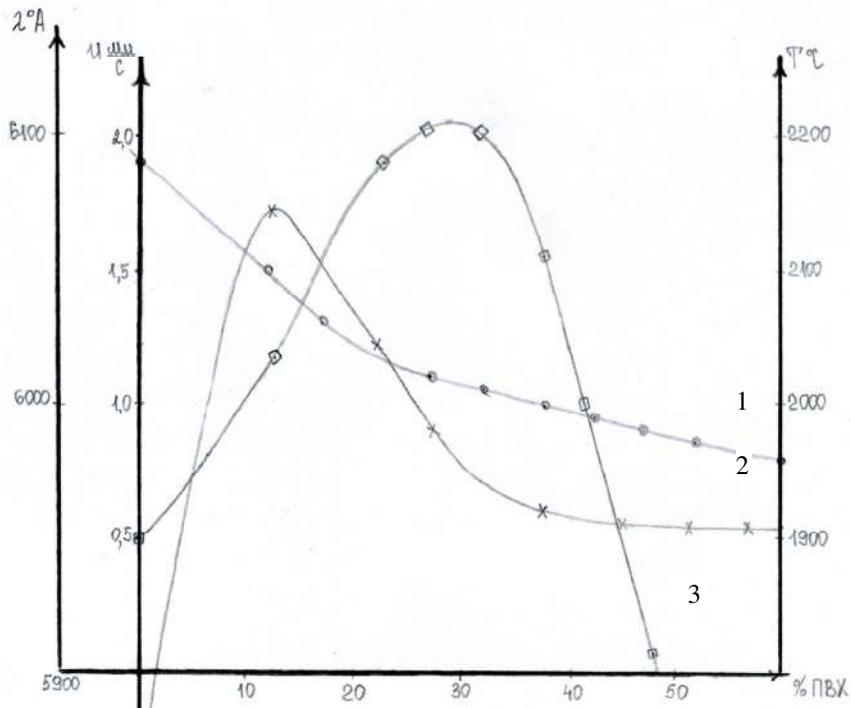


Рис. 25. Влияние содержания ПВХ на основные характеристики сигнального состава на основе  $Sr(NO_3)_2$ , содержащего 18% МПФ-3:

- 1 – кривая зависимости скорости горения от % ПВХ;
- 2 – кривая зависимости температуры от % ПВХ;
- 3 – кривая зависимости доминирующей длины волн от % ПВХ

Качественный анализ спектра излучения состава с лучшей насыщенностью пламени красным цветом (20% ПВХ) приведен в табл. 14.

Таблица 14

**Качественный состав излучателей пламени (20% ПВХ)**

Длина волны, Å		Излучатели	Длина волны, Å		Излучатели
вычисл.	отожд.		вычисл.	отожд.	
6820М	6820М	SrOH	6114М	6114М	SrOH
6760Ф	6755Ф	SrCl	6050М	6050М	SrOH
6740Ф	6744Ф	SrCl			
6680М	6675М	SrOH	5890	5889,5	Na
6670М	6672,4М		5895	5895,9	
6620Ф	6619,9Ф	SrCl	5545	5540	Sr
6615Ф	6613,7Ф	SrCl	5185	5183,5	Mg
6594М	6590М	SrOH	5173	5172,7	Mg
6481Ф	6482,9Ф	SrCl	5167	5167,3	Mg
6460М	6460М	SrOH	5007	5007,3	MgO
			4996	4996,7	MgO
6361Ф	6362,4Ф	SrCl	4985	4985,9	MgO
6350Ф	6358,7Ф	SrCl	4970	4969,5	MgO
6240Ф	6239,3Ф	SrCl	4961	4962,2	Sr
			4876	4876,3	
			4872	487205	
			4832	4832,1	
			4811	4811,9	
			4784	4784,3	
			4741	4741,9	
			4722	4722,3	
			4607	4607,3	
6225Ф	6224,9Ф	CaCl	4572	4571,1	Mg

Спектр пламени отличается наличием интенсивных линий стронция Sr и большого количества интенсивных полос хлорида стронция SrCl. Имеются линии магния и полосы MgO. В спектре

также зафиксированы полосы моногидрата стронция. Представляло интерес сравнить спектральный состав излучения, полученный для смесей на поливинилхлориде со спектральным составом излучения смесей, содержащих хлорид стронция. В табл.15 приведен качественный анализ спектра пламени смеси, содержащей 20% SrCl<sub>2</sub>.

Таблица 15

**Состав продуктов излучения**

Длина волны, Å		Излучатели	Длина волны, Å		Излучатели
вычисл.	отожд.		вычисл.	отожд.	
6820M	6820M	SrOH	6114Ф	6109Ф	SrOH
6750Ф 6744Ф	6755,6Ф 6744,7Ф	SrCl	6050Ф	6076Ф	SrOH
6675M 6670M	6675M 6672,5M	SrOH	5895 5890	5889,5 5895,9	Na
6620Ф 6550Ф	6619,9Ф 6613,7Ф	SrCl	5545	5540	Sr
6590M	6590M	SrOH	5185 5170	5183,6 5172,7 5167,3	Mg
6480Ф	6482,9Ф	SrCl	5007- 4970	5007,3 4996,7 4996,5 4985,8	MgO
6460M	6460M	SrOH	4962,2 4876 4872 4811 4784 4741 4722 4607	4962,2 4876,3 4872,5 4811,9 4784,3 4741,9 4722,3 4607,3	Sr
6360Ф 6350Ф	6362,4Ф 6358,7	SrCl	4572	4571,1	Mg
6240Ф	6239,3Ф	SrCl	4215	4215,5	Sr

По качественному составу спектры пламени не отличаются. В спектре наблюдается большое количество интенсивных полос монохлорида стронция. Но по цвету пламени этих составов отличаются.

У составов, содержащих хлорид стронция, цвет пламени значительно хуже, хотя состав и количество излучателей в красной области спектра почти не изменяются.

Очевидно, имеет значение не только концентрация монохлорида стронция в пламени, но имеет значение механизм его образования ( $\text{SrCl}$  является или продуктом диссоциации  $\text{SrCl}_2$ , или продуктом соединения ионов, полученных в пламени при разложении солей стронция и хлорирующих добавок).

Для сравнения были изучены спектры пламени составов на основе перхлората аммония. В табл. 16 приведен качественный анализ спектра состава с 30% перхлората аммония.

Таблица 16

### Состав продуктов излучения

Длина волны, Å		Излучатели	Длина волны, Å		Излучатели
вычисл.	отожд.		вычисл.	отожд.	
1	2	3	4	5	6
6820M	6820M	SrOH	6465M	6460,4M	SrOH
6760Ф 6740Ф	6755,6Ф 6744,7Ф	SrCl	6114Ф 6076Ф 6050Ф	6109Ф 6076Ф 6050Ф	SrOH
6680M 6670M	6675M 6672,4M	SrOH	5895 5890	5889,5 5895,9	Na
6620Ф	6619,9Ф	SrCl	5540	5540	Sr
6590M	6590M	SrOH	5185- 5170	5183,6 5172,7 5167,3	Mg
6480Ф	6482Ф	SrCl	5007- 4970	5007,3 4996,7 4996,5 4985,9	MgO

Окончание таблицы 16

1	2	3	4	5	6
6360Ф	6362,4Ф 6358,7Ф	SrCl	4960- 4610	4962,2 4876,3 4872,5 4811,9 4784,3 4741,9 4722,3 4607,3	Sr
6240Ф	6239,3Ф	SrCl	4215	4215,5	Sr

Качественный состав излучателей в спектрах составов на основе перхлората аммония не зависит от содержания перхлората аммония. В пламени этих составов основными излучателями являются SrOH, SrCl.

Распределение оптической плотности почернения по длинам волн получено на микрофотометре ИФО-451 (рис. 26).

Принцип работы двухлучевого регистрирующего микрофотометра основан на сравнении – компарировании – светового потока Ф-1, прошедшего через измеряемый объект, со световым потоком оптической ветви Ф-2, прошедшим через прецизионный "серый" клин с переменной по длине оптической плотностью.

В этой схеме использован общий для обоих каналов источник света 1 и общий приемник излучения 6 – фотоэлектронный умножитель ФЭУ-17А.

Сравниваемые световые штоки Ф-1 в Ф-2 поочередно проходят секторные вырезы в диске 7 модулятора, который вращается от электродвигателя 8. Если оба потока, попадающие на фотоприемник, одинаковы, то в анодной цепи ФЭУ фототок отсутствует, так как усилитель на постоянный ток не реагирует. Если потоки Ф-1 и Ф-2 не равны, то в анодной цепи ФЭУ появляется пульсирующий ток. К фотоэлектронному умножителю подключен усилитель переменного тока, настроенный на частоту модуляции световых пучков. Сигнал отработки поступает на управляющую обмотку серводвигателя 4, приводящего в движение фотометрический клин 3.

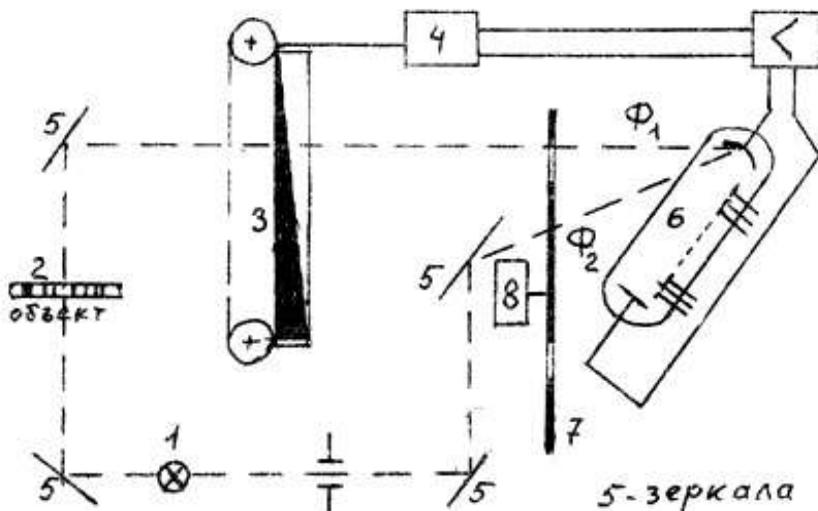


Рис.26. Принципиальная схема микрофотометра ИФО-451:

- 1 – источник света;
- 2 – измеряемый объект;
- 3 – клин фотометрический;
- 4 – серводвигатель;
- 5 – усилитель переменного тока;
- 6 – фотоприемник;
- 7 – диск модулятора;
- 8 – электродвигатель;
- I - ветвь измерительная;
- II - ветвь сравнения.

Кинематический клин связан с пером самописца. Следовательно, перемещение пера будет однозначно связано с оптической плотностью исследуемого объекта. Отработка будет происходить до выполнения условия  $\Phi_1 = \Phi_2$ .

На рис. 27. представлена фотография спектрального распределения оптической плотности для состава красного огня.

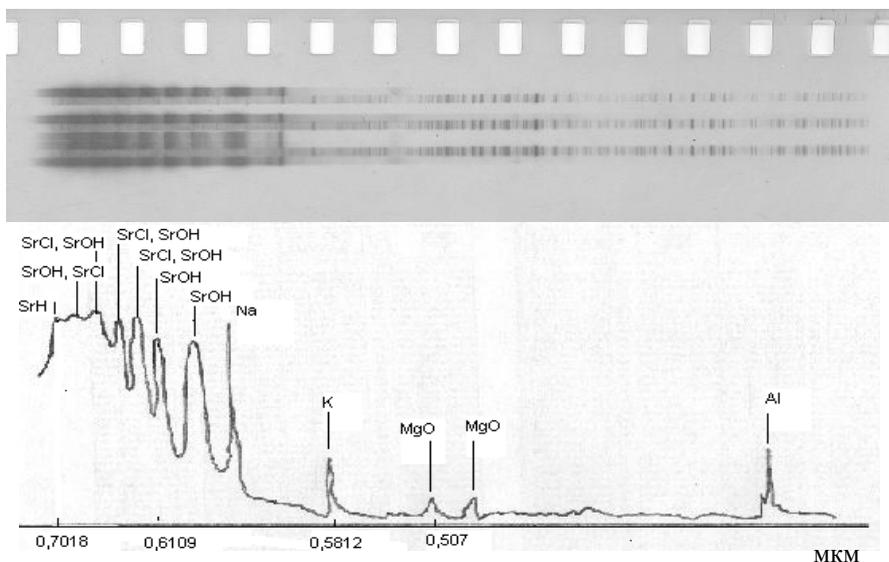


Рис. 27. Фотография спектральное распределение оптической плотности для состава красного огня

Цвет пиротехнического пламени обеспечивается оптимальными условиями для излучения целевых продуктов. Каждая полоса излучения имеет предельное значение максимальной интенсивности при данной температуре источника. При значительной концентрации молекул данного сорта в пламени может начаться процесс поглощения излучения невозбужденными молекулами (явление самопоглощения). Явление самопоглощения наблюдается во всех пламенах. Температурная неоднородность пламени, его объемная протяженность обуславливают присутствие в пламени значительной доли невозбужденных продуктов сгорания, которые будут приводить к самопоглощению селективной полосы излучения. Самообращению подвергнуты чаще всего спектральные линии и полосы с низкими потенциалами возбуждения. Поэтому доля основных селективных излучателей должна соответствовать некоторому оптимальному значению.

Термодинамический расчет позволяет для различных рецептов составов цветного огня привести сравнительный анализ расчетной

доли целевых продуктов сгорания в этих составах. Для составов красного огня расчет дает в продуктах сгорания сложное соединение  $\text{SrOHCl}$ , которое в различных зонах пламени может разлагаться (в зависимости от сопутствующих условий), давая дополнительные селективные излучатели. Количество этого сложного соединения по результатам расчета намного превышает долю основных селективных излучателей  $\text{SrCl}$  и  $\text{SrOH}$  в составах красного огня. Спектральные исследования составов красного огня подтверждают вклад в излучение пламени газообразных целевых продуктов  $\text{SrCl}$  и  $\text{SrOH}$ .

Вероятность излучения целевых продуктов ограничена их диссоциацией при высокой температуре пламени, превышающей их температуру диссоциации. В качестве такого высокотемпературного пламени можно рассмотреть пламя состава цветного огня на основе баллиститного пороха с температурой горения 3000К. На рис. 28 показаны спектры пламени состава на кислородсодержащем окислителе ( $\text{Sr}(\text{NO})_2 + \text{ПВХ}$ ) и состава на баллиститной основе. Приведенные спектральные данные убедительно показывают, что в высокотемпературном пламени наблюдаются интенсивные полосы излучения молекулы  $\text{SrOH}$ .

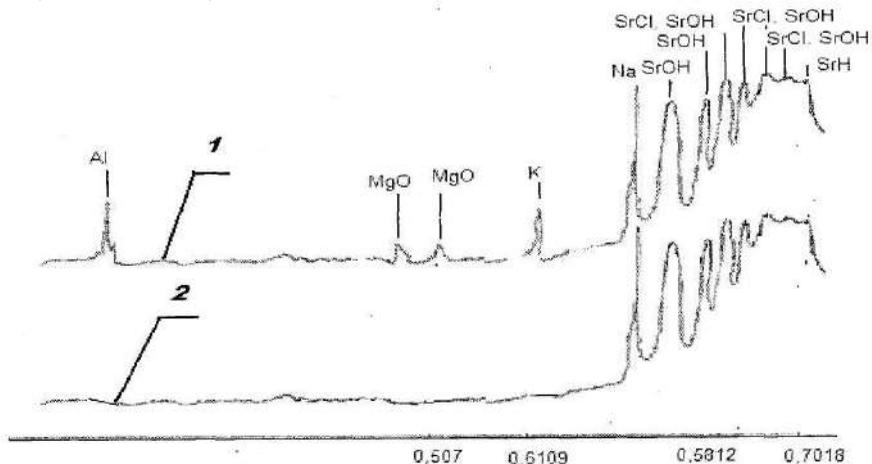


Рис. 28. Спектральные исследования пламен:

- 1 – состав на кислородсодержащем окислителе ( $\text{Sr}(\text{NO})_2 + \text{ПВХ}$ );
- 2 – состав на баллиститной основе

Одна и та же полоса селективного излучателя может проявляться по-разному в зависимости от состава окружающих в пламени газообразных продуктов. Пиропороховое пламя составов на пороховой основе обогащено азотом и соединениями углерода. В пламени состава красного огня основными селективными излучателями являются молекулы SrCl и SrOH. В пиропороховом пламени наблюдается резкое изменение контуров полос этих селективных излучателей: значительно увеличивается площадь контуров этих полос. Это наблюдаемое уширение полос может быть связано с наложением интенсивных полос радикала CN в красной области. Наблюдаемые изменения в структурах полос этих селективных излучателей приводит к увеличению доли селективного излучения целевых продуктов сгорания в условиях пиропорохового пламени.

Расчет чистоты цвета производится по полученным кривым распределения относительной интенсивности излучения. Результаты измерения приведены в табл. 17.

Таблица 17

**Доминирующая длина волны и чистота цвета ПС**

№ состава	Состав, %	Доминирующая длина волны, λ, нм	Чистота цвета, %	Визуальное определение цвета
1	2	3	4	5
1.	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> – 82 МПФ-3 – 18	595	90	Бледно-розовый
2.	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> – 70 МПФ-3 – 18 ПВХ – 12	592	92	Бледно-розовый
3.	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> – 50 МПФ-3 – 18 ПВХ – 32	596	94	Ярко-розовый, близкий к красному
4.	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> – 35 МПФ-3 – 18 ПВХ – 47	591	83	Желто-оранжевый

1	2	3	4	5
5.	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> – 50 МПФ-3 – 18 ПВХ – 27 Идитол – 5	610	85	Насыщен- ный красный
6.	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> – 70 МПФ-3 – 18 NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub> – 12	596	85	Белый со слабо- розовым оттенком
	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> – 25 МПФ-3 – 18 NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub> – 57	599	87	Насыщенны й розовый
7.	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> – 16 МПФ-3 – 18 NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub> – 67	586	87	Розовый
8.	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> – 24 МПФ-3 – 18 NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub> – 53 Идитол – 5	604	92	Цвет темно- розовый, близкий к красному
9.	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> – 20 МПФ-3 – 18 NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub> – 57 Идитол – 5	603	90	Розовый с красным
10.	SrCl <sub>2</sub> – 20 МПФ-3 – 18 NH <sub>4</sub> ClO <sub>4</sub> – 57 Идитол – 5	600	87	Ярко- розовый
11.	SrCl <sub>2</sub> – 20 Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> – 60 МПФ-3 – 20	594	97	Бледно- розовый

Анализ некоторых из полученных данных, которые приведены в табл. 17, показывают, что состав с насыщенным красным цветом имеет доминирующую длину волны 6100 нм. Если доминирующая длина волны меньше, то даже при большей чистоте цветового тона пламя имеет менее насыщенную окраску пламени красным цветом.

## 8 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАМЕН СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ НИТРАТА БАРИЯ

Пламя при горении смесей на основе нитрата натрия имеет интенсивный сплошной спектр, на фоне которого выделяются линии и полосы газообразных продуктов горения. В спектре присутствует большое количество линий бария, которые образуются при диссоциации нитрата бария и продуктов его разложения. Из продуктов разложения окислителя в пламени наблюдаются полосы оксида бария и трехатомной молекулы ВаОН.

Были исследованы спектры пламен составов с различным процентным содержанием металлического горючего: от 20 до 60% магния, т.е. с разными температурными условиями в пламени и разным содержанием конденсированных продуктов горения.

В спектрах всех рассмотренных составов идентифицируются полосы газообразных магния и оксида магния. С ростом процентного содержания металла снижается доля селективного излучения газообразных продуктов горения в общем излучении пламени в видимой области спектра.

Если в составе с 20% магния наблюдаются следующие полосы оксида бария 682,2; 649,8; 649,3; 629,1; 622,4; 616,5; 603,9; 597,6; 586,4; 580,5; 570,1; 564,4; 549,2; 534,9; 521,4; 508,6 нм, то в спектре пламени состава с 60% магния количество полос оксида бария значительно уменьшается.

Если взять смесь нитрата бария с цирконием, то на полученной спектрограмме хорошо видно, что основными излучателями такой смеси является ВаО и ВаОН: полосы ВаО – 480; 524; 610; 629; 817; 865 нм и очень интенсивные полосы ВаОН – 783 и 830 нм. Наиболее интенсивные полосы ВаО приходятся на красную область спектра (рис. 29).

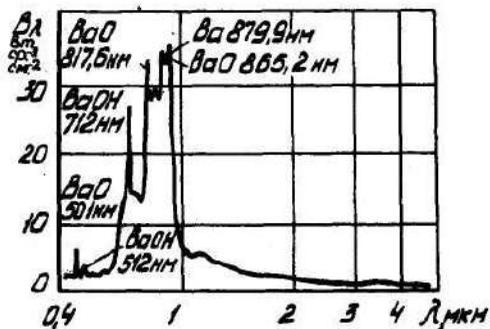


Рис. 29. Спектр излучения смеси цирконий-нитрат бария

Смесь нитрата бария со сплавом дает спектр пламени с большим количеством селективных излучателей. В спектре этого пламени в видимой области спектра, полученном на спектрографе ИСП-51, присутствуют интенсивные полосы излучения ВаО: 649,0; 610,0; 586,4; 564,4; 534,9 и 485,0 нм (рис. 30).

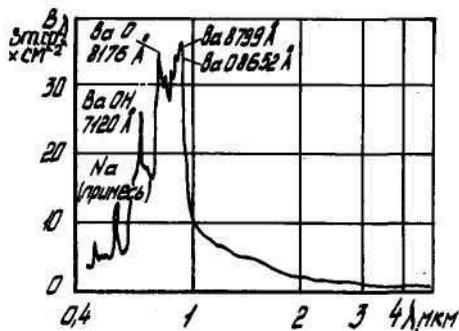


Рис. 30. Спектр излучения пламени смеси нитрата бария с магнием

Наиболее интенсивные полосы ВаОН приходятся на ближнюю инфракрасную область спектра 712; 783 и 830 нм, то на данной спектрограмме они не зафиксированы. Некоторые полосы излучения ВаОН могут накладываться в зеленой области спектра на спектры молекул ВаО. Эти накладывающиеся полосы нескольких излучателей обуславливают появление в спектре излучения специфично широких полос излучения на отдельных участках спектра.

## 8.1 Спектральные исследования пламен составов зеленого огня

Практическое применение в пиротехническом зеленом пламени нашли соединения бария. Оксид бария дает желто-зеленую окраску пламени, а монохлорид бария – зеленую окраску. Для получения зеленого пламени в качестве носителя цветности обычно применяется нитрат бария.

Спектр пламени двойной смеси на основе нитрата бария характеризуется наличием полос оксида бария, линий атомарного бария и магния. Наблюдаемые полосы BaO занимают весь видимый спектр. Некоторые наиболее яркие канты этих полос: 629, 604, 586, 564, 549, 509 нм (наиболее интенсивные полосы в красной области спектра).

Введение в двойную смесь хлорсодержащей добавки приводит к образованию в пламени монохлорида бария. Монохлорид бария имеет три системы полос, зеленая система включает полосы: 524, 523, 514, 513 нм. Менее интенсивные полосы: 532, 517 нм. Монохлорид бария обладает достаточно узким спектральным диапазоном излучения. Для монохлорида бария характерна замена галогена на кислород в окислительной атмосфере, в результате начинает излучать молекула BaO. Наличие в пламени восстановительной атмосферы препятствует этому переходу. Спектр излучения пламени состава зеленого огня приведен на рис. 31.

В спектре наблюдается большое количество полос BaO и BaCl. Наиболее интенсивными в спектре монохлорида бария являются полосы 524 и 514 нм. Наблюдаемые полосы оксида бария занимают всю видимую область и одна из полос расположена в красной области спектра. В спектре пламени зеленого огня идентифицированы полосы моногидроксида бария BaOH 512 и 487 нм. Концентрация основных излучателей в пламени и их вклад в селективное излучение зависит от температурных условий в пламени (диссоциация целевых продуктов снижает интенсивность полос излучения и вклад в общее селективное излучение) и от сопровождающей это излучение среды.

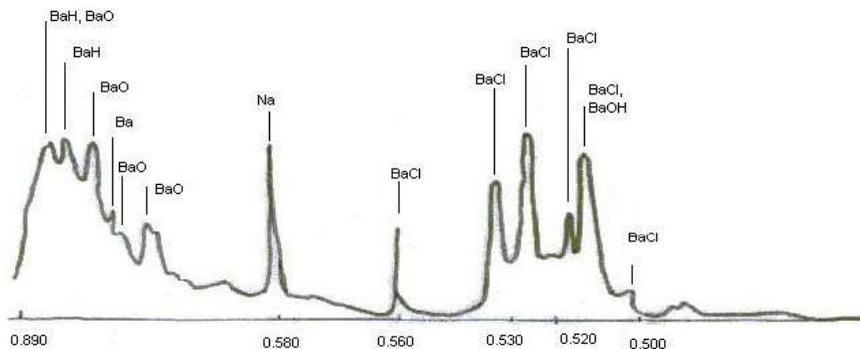
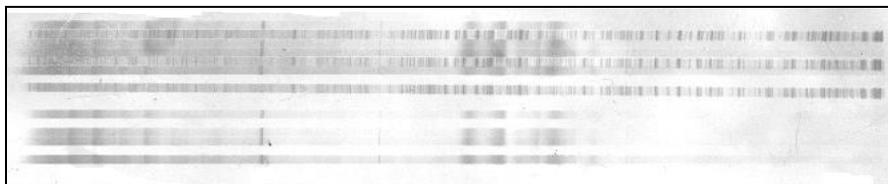


Рис. 31. Фотография и кривая спектрального распределения для состава зеленого огня

По Гурвичу Л.В. и др. излучение молекулы  $\text{BaCl}$  значительно уступает по спектральному показателю поглощения трехатомной молекуле  $\text{BaOH}$ . Поэтому полоса излучения  $\text{BaOH}$  в зеленой области спектра 512 нм дает значительный вклад в селективное излучение пламени наряду с излучением молекул  $\text{BaCl}$ .

## 8.2 Спектральные исследования пламен составов на основе сульфата кальция

Спектральный анализ пламен составов на основе сульфата кальция показал, что плотное почернение в длинноволновой области спектра обусловлено присутствием в пламени возбужденных молекул CaO и MgO.

Распределение плотности почернения идет неравномерно. Более плотное почернение в длинноволновой области, ослабление наблюдается только в зеленой области (табл. 18). Плотную область почернения обеспечивают возбужденные молекулы CaO, включающие красно-оранжевую область:  $\lambda\lambda = 663,92; 662,50$  нм – красная система.

Таблица 18

Система полос CaO с кантами, оттененными в обе стороны

$\lambda\lambda$ , нм	Интенсивность, I	$\lambda\lambda(*)$ , нм	Интенсивность, I
636,2 М	4	608,8 К	5
634,4 М	4	607,5 Ф	5
631,8 М	2	606,9 Ф	7
628,1 М	3	606,5 К	5
627,8 Ф	4	605,6 К	5
626,2 М	8	604,1 К	3
625,85Ф	9	600,6 Ф	8
618,3 Ф	6	600,3 К	8
609,7 Ф	10	598,3 К	8
609,2 Ф	6		

Примечание: Интенсивности полос CaO приведены по 10-балльной шкале

Возбужденные молекулы MgO образуют зеленую систему. Она более интенсивная по сравнению с красной.

Наблюдаются две полосы: одна с  $\lambda\lambda = 519,2; 517,74; 516,25$  нм; другая –  $\lambda\lambda(*) = 500,73; 499,67; 498,59; 497,45$  нм.

Зеленая система – это диффузная полосатая структура без видимой вращательной тонкой структуры, простирающаяся от 547,3 мкм примерно до 556,0 нм. При малой дисперсности система

имеет вид диффузной полосы с кантом при 547,3 нм с красным оттенением.

При большой дисперсии кант менее ясен, но имеются максимумы интенсивности примерно при  $\lambda\lambda = 550,6; 549,8; 549,6; 549,2; 548,8; 548,4; 547,6$  и  $547,3$  нм.

Кант при  $\lambda\lambda(*) = 549,8$  нм относительно интенсивен и кажется оттененным в сторону красного конца.

Интенсивность серии полос CaO превышает интенсивность MgO. CaO возбуждается легче и условия появления более благоприятные по сравнению с MgO.

В спектрах пламен также присутствует излучение Ca  $\lambda\lambda(*) = 671,775$  нм. Основную долю излучения составило тепловое излучение в области от  $\lambda\lambda = 636,2$  до  $547,3$  нм. Дополнительный вклад в излучение вносит излучение Ca. Основное излучение приходится на молекулы CaO в области частот от  $636,2$  до  $598,3$  нм.

Спектр состава на основе кальцийсодержащих соединений хорошо согласуется с классическим спектром CaO (рис. 32).

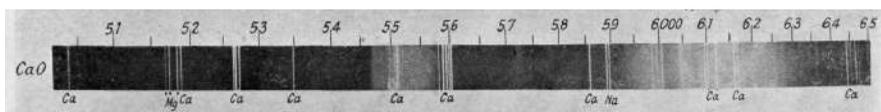


Рис. 32. Полосы CaO в спектрах на основе кальцийсодержащих соединений

Таким образом, результаты спектрального анализа свидетельствуют о том, что в пламени смеси сульфата кальция с магнием присутствуют CaO и MgO. Интенсивность излучения, в основном, связана со скоростью горения составов.

## 9 СПЕКТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Спектры излучения щелочных металлов состоят из резонансных линий, имеющих низкий потенциал возбуждения (Na – 2,1 эВ, Cs – 1,38 эВ).

Спектральные линии имеют определенную ширину и характерный контур. Уширение спектральной линии может вызываться различными факторами. В спектре излучения атомов в пламени наиболее важными является уширение вследствие теплового движения атомов (доплеровское уширение) и уширение вследствие соударений возбужденных атомов с другими частицами (лоренцевское уширение). С ростом концентрации излучающих атомов в центральной части линии интенсивность излучения достигает своего максимума и начинается рост интенсивности излучения в периферийных частях линии.

Пламена, содержащие пары излучающего металла, являются источниками света, селективно излучающими и поглощающими свет при определенных длинах волн. Излучаемая частью возбужденных атомов энергия при прохождении через толщу протяженного пламени начинает поглощаться атомами того же элемента, находящимися в невозбужденном состоянии. Это приводит к эффекту самопоглощения центральной части резонансной линии. Такая самопоглощенная линия характеризуется интенсивными и широкими крыльями, которые могут вносить значительный вклад в общее излучение пламени.

На рис. 33-34 приведены спектральные линии цезия. Спектрограмма наглядно показывает широкие крылья самообращенной резонансной линии цезия (6824,65-6870,46Å), энергия излучения этих крыльев составляет примерно 50% от общего излучения пламени в этом диапазоне спектра.

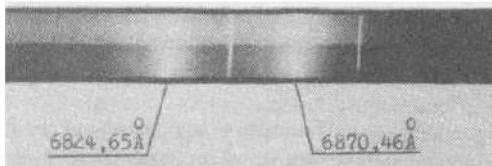


Рис. 33. Спектральные линии излучения цезия

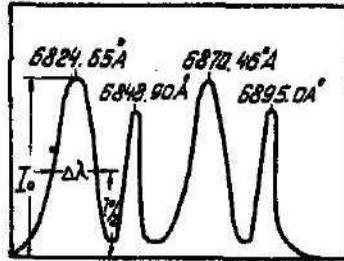


Рис. 34. Контуры линий излучения цезия в спектральном интервале 6806-6920 Å

На рис. 35-38 показан контур самообращенной линии натрия с указанием ширины крыльев этой резонансной линии в излучении.

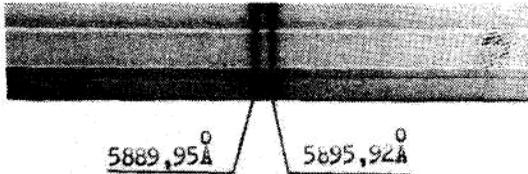


Рис. 35. Спектр поглощения дублета натрия

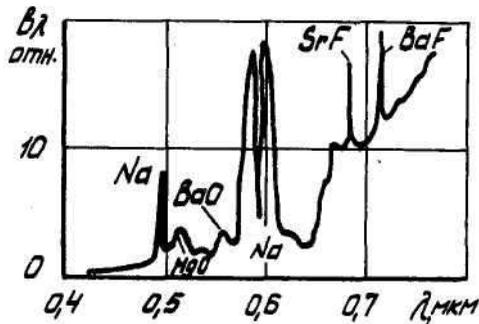


Рис. 36. Спектр пиротехнического состава на основе нитрата натрия

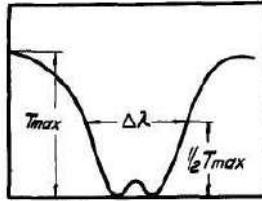


Рис. 37. Контур поглощения дублета натрия:  
 $T_{\max}$  – максимальный коэффициент поглощения;  
 $\Delta\lambda$  - полуширина контура поглощения

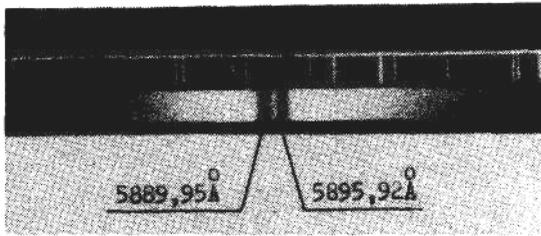


Рис. 38. Спектр излучения пламени в районе резонансного дублета натрия

На рис. 39-40 приведены спектры излучения двойных металлсодержащих смесей, в которых также наблюдаются широкие крылья самообращенных линий натрия и калия.

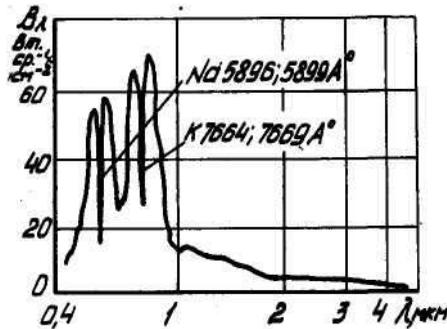


Рис. 39. Спектр излучения пламени смеси магний – нитрат калия – нитрат натрия

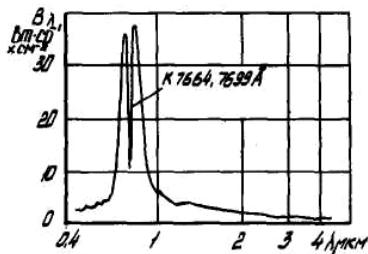


Рис. 40. Спектр излучения пламени смеси магний-нитрат калия

Линии лития в меньшей степени подвержены самопоглощению и крылья этих линий менее слабо выражены. Спектр лития включает две линии 610 нм (3,8 эВ), 671 нм (1,8 эВ). Более трудно возбудимой является линия 610 нм.

На кафедре ТИПиКМ (ХТГС) проводились работы по изучению возможности участия атомарного лития в образовании красного цвета пламени.

Две характерные линии лития проявляются по-разному в пламенах литиевых составов. Линия 610 нм чаще наблюдается в более горячей части пламени смесей с  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (80%) + МПФ-3 (20%),  $\text{LiNO}_3$  (80%) + МПФ-3 (20%),  $\text{Li}_2\text{SO}_4$  (80%) + МПФ-3 (20%), содержащих металл, в самообращении с протяженными крыльями (рис. 41).

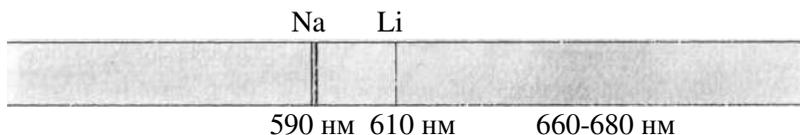


Рис. 41. Спектр пламени состава  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (80%) + МПФ-3 (20%)

В безметальном пламени смесей уротропин (85%) +  $\text{LiNO}_3$  (15%) и уротропин (85%) +  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (15%)  $T \approx 600 \text{ K}$  в спектре присутствует линия 671 нм, а на линию 610 нм накладывается континуум, затрудняющий ее идентификацию (рис. 42).

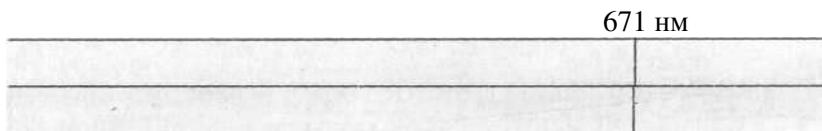


Рис. 42. Спектр пламени состава уротропин (85%) +  $\text{LiNO}_3$  (15%)  
и уротропин (85%) +  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (15%)

На рис. 43-44 показаны возможности использования лития для получения красного цвета пламени, на которых видно, что пламена составов на основе лития получают оптически прозрачными.



Рис. 43. Пламя состава уротропин (85%) +  $\text{LiNO}_3$  (15%)



Рис. 44. Пламя состава уротропин (85%) +  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  (15%)

## 10 СПЕКТР ПЛАМЕНИ СОСТАВОВ НА ОСНОВЕ ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ

Составы на перхлорате аммония в зависимости от природы металлического горючего могут сгорать равномерно или в пульсирующем режиме.

На рис. 45 приведен спектр пламени равномерно горящей смеси перхлората аммония с магнием.



Рис. 45. Спектр пламени равномерно горящей смеси перхлората аммония с магнием

Смесь содержит 60% МПФ-4, что приводит к высокой температуре в зоне пламени. На фоне сплошного спектра выделяются линии и полосы газообразных селективных излучателей: Mg, MgO, MgH. Спектр пламени, полученный в видимой области спектра на спектрографе ИСП-51, не содержит полос газообразного MgCl, так как они приходятся на ультрафиолетовую область спектра.

В табл. 19 приводится спектр пламени, полученный в видимой и ультрафиолетовой областях, для пульсирующей смеси перхлорат аммония + сплав АМ. В ультрафиолетовой области спектра идентифицируются полосы MgCl и AlCl.

Таблица 19

**Спектр пламени для пульсирующей смеси  
перхлорат аммония + сплав АМ**

Излучатели	$\lambda$ , Å	Энергия возбуждения, эВ
Mg	5183,6	
	5172,7	
	5167,3	5,11
	2852,0	4,34
	4571,1	2,76
MgO	5208,0	2,5
	5007,3	
	4996,7	
	4985,9	
	4969,5	
MgCl	3860,5	4,8
Al	3961,5	3,14
AlO	5110,2	4,1
	5079,0	
	4842,0	
	4848,0	
	4866,0	
AlH	4670,0	2,9
	4241,0	
AlCl	4702,0	4,7
	2696,0	
	2614,4	
NH	4510,0	4,96
NH <sub>2</sub>	4515,0	1,26
NO	2027,0	5,7
	3572,0	
ClO	3957,0	3,8
	3652,0	
ClO <sub>2</sub>	3841,0	2,6
	3772,0	
	3680,0	

## 11 СПЕКТРАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПИРОПОРОХОВОГО ПЛАМЕНИ

В металлсодержащих пиропороховых системах нитраты целлюлозы выполняют роль термической и технологической основы. Нитраты целлюлозы имеют низкую температуру разложения и образуют при горении значительное количество газообразных продуктов.

В пламени нитрата целлюлозы наблюдается излучение в различных диапазонах спектра  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{CN}$ ,  $\text{C}_2$ . В видимой области спектра только в зоне максимальной температуры пламени наблюдается излучение радикала  $\text{C}_2$ . Радикал  $\text{CN}$  может интенсивно высвечивать в спектре пламени в видимой области. По справочным данным этот радикал проявляется в спектре излучения в среде активного азота, содержащей одновременно и соединение углерода. Наиболее интенсивные полосы радикала  $\text{CN}$ : 665,6 нм; 650,2 нм; 635,5 нм. Среда горения пороха содержит активный азот и соединения углерода, что должно способствовать проявлению излучения этого радикала в пиропороховом пламени.

Радикал  $\text{OH}$  дает интенсивное излучение в ультрафиолетовой части спектра. Большинство образующихся при горении нитрата целлюлозы продуктов сгорания дают излучение в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра:

$\text{CO}_2$  (326,5 нм; 2,8 мкм; 4,37 мкм)

$\text{CO}$  (324,2 нм; 2,4 мкм; 4,63 мкм)

$\text{NO}_2$  (2,26 мкм)

$\text{NO}$  (394,9; 5,45 мкм) и т. д.

Пламя нитрата целлюлозы в видимой области спектра не имеет собственной интенсивной селективной составляющей, что позволяет в этой области без помех проявляться излучению дополнительно образующихся целевых продуктов горения.

Известно, что доля каждого продукта в общем излучении пламени определяется интенсивностью соответствующих линий и полос.

Механизм возбуждения продуктов сгорания в зоне пламени определяется законами термического возбуждения. В случае

термического возбуждения основными факторами, определяющими интенсивность излучаемой линии или полосы, являются концентрация возбужденных соединений, энергия возбужденного уровня и температура источника возбуждения.

$$I_{mn} = A_{mn} N_0 h\nu \frac{g_m}{g_n} e^{-\frac{E_m}{kT}}, \quad (12)$$

где  $A_{mn}$  – вероятность перехода возбужденного элемента из состояния с энергией  $E_m$  до  $E_n$ ;

$N_0$  – общее число элементов данного сорта;

$h$  – постоянная планка;

$\nu$  – частота излучения;

$g_m$  и  $g_n$  – статические веса атомов с энергией  $E_m$  и  $E_n$ ;

$E_m$  и  $E_n$  – энергия атома в состояниях "m" и "n";

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура источника.

На рис. 46 представлено графически, какая доля от общего числа соединений или атомов данного сорта возбуждается (в зависимости от потенциала возбуждения данного спектрального перехода) для источников излучения с различной температурой.

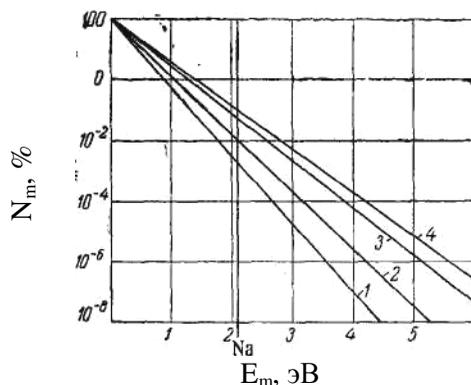


Рис. 46. Зависимость между потенциалом возбуждения  $E_m$  и числом атомов  $N_m$ , получающих энергию, равную или большую потенциала возбуждения:  
 1 – при 2100 К; 2 – при 2500 К; 3 – при 3000 К; 4 – при 3300 К

По оси ординат отложено относительное число возбужденных атомов, а по оси абсцисс – энергия возбуждения (потенциал возбуждения) в электрон – вольтах. Линии на графике соответствуют источникам с различной температурой (от 2100 К до 3300 К).

Из рис. 46 наглядно видно, например, что при потенциале возбуждения 2,1 эВ число атомов, достигающих этой энергии при температуре 2500 К почти на порядок больше, чем при температуре 2100 К. Поэтому интенсивность селективного излучения целевого продукта может резко изменяться при изменении температурных условий в зонах пламени.

Температура пламени металлизированного пороха определяется природой и содержанием металлического горючего. Экспериментальные данные по изменению температуры пламени в зависимости от процента содержания сплава Al для баллиститного пороха приведены на рис. 47 для  $p=10^5$  Па.

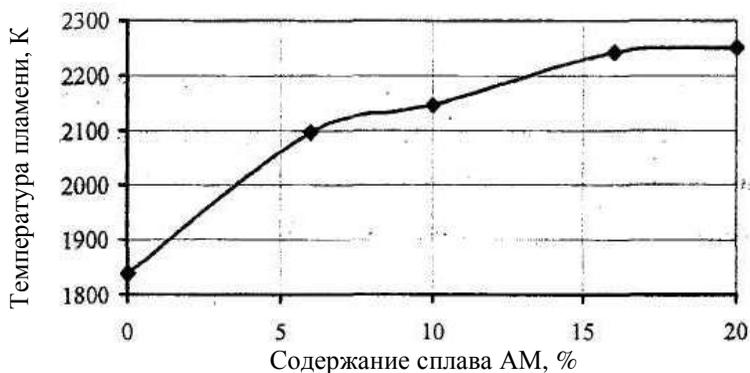


Рис. 47. Влияние содержания сплава Al на максимальную температуру пламени баллиститного пороха

Содержание сплава Al изменялось от 5 до 20%. Температура пламени измерялась фотометрическим методом. Полученные данные показывают, что в интервале от 5 до 15 % максимальная температура пламени изменяется незначительно и составляет ~2100 К, дальнейшие увеличения содержания Me приводят к росту температуры до 2250 К.

При полученных значениях температуры пиропорохового пламени образующиеся при окислении металлов оксиды магния и алюминия будут находиться в конденсированном состоянии, что приводит к появлению интенсивного непрерывного спектра.

На фоне этого непрерывного спектра будут наблюдаться полосы целевых селективных излучателей. Селективные излучатели – это газообразные продукты с известным положением их основных полос излучения. Вклад каждой полосы в общее излучение пламени определяется контуром этой полосы (интенсивностью в центре и шириной).

## 12 УФ-СПЕКТРЫ ПЛАМЕНИ

В литературе описывается аномально высокая излучательная способность некоторых углеводородных пламен в УФ-области спектра. Авторы объясняют это вкладом в излучение неустойчивых радикалов и соединений, которые образуются в пламени в процессе горения: CH, OH, CN и др.

В УФ-области может возникать не только тепловое, но и хемилюминесцентное излучение этих радикалов.

Селективный вклад в излучение пламени в УФ-области могут обеспечить только те газообразные продукты горения, полосы излучения которых расположены в этой области спектра.

В табл. 20 приводятся длины волн полос излучения некоторых вероятных продуктов горения в УФ-области спектра. Приведенные данные показывают, что в качестве излучателей могут быть выбраны хлориды, фториды металлов и соединения бора. Вероятность возбуждения в пиротехническом пламени этих соединений зависит от температуры пламени и состава среды, сопровождающей эти продукты в пламени.

Таблица 20

### Целевые продукты горения в УФ-области спектра

Излучатели	Диапазон излучения, нм
I	2
Mg	371, 383, 392
MgCl	371, 385
MgO	364÷396
AlO	294, 302, 311÷250
AlCl	271÷256, 261
AlF	324, 393
MgF	350÷369, 225÷239, 265÷274
OH	281, 306, 307, 309, 312
CH	314, 363, 387, 389, 390
CN	388÷359
BO	220÷349, 271, 275, 280, 285, 289, 367÷384

1	2
CaF	337÷352
CaO	328÷375
BCl	288÷265
CaCl	371÷382
BF	354÷263

На рис. 48 приведены спектры пламен перхлоратно-магниевых составов. В этом спектре в УФ-области спектра идентифицированы полосы излучения MgOH (370 нм) и MgCl (385 и 378 нм). Наблюдаемые в спектре этого пламени полосы идентифицированных селективных излучателей имеют значительную интенсивность, что обеспечивает их вклад в УФ-излучение пламени.

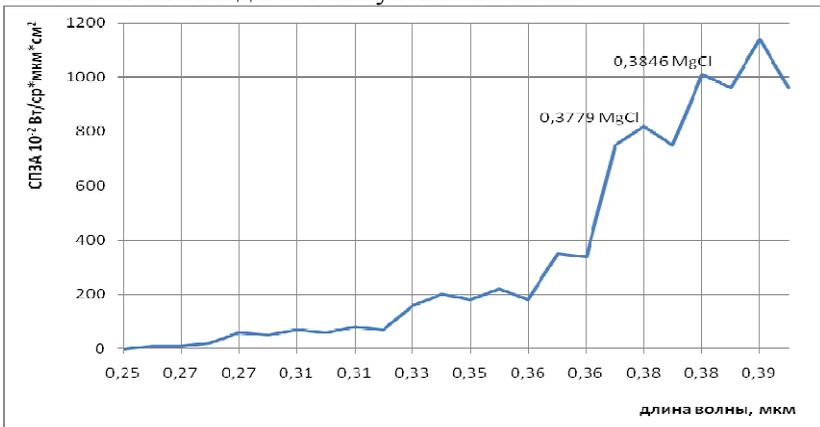


Рис. 48. Распределение спектральной плотности энергетической яркости по длинам волн состава ПХА-магний

Введение органического горючего в состав на перхлорате аммония приводит к снижению температуры пламени, но излучение селективных излучателей сохраняется. На рис. 49 приведены кривые спектрального распределения энергии для двух- и трехкомпонентных смесей на перхлорате аммония. Из рисунка отчетливо видно, что в спектре пламени трехкомпонентной смеси селективность излучения более резко выражена.

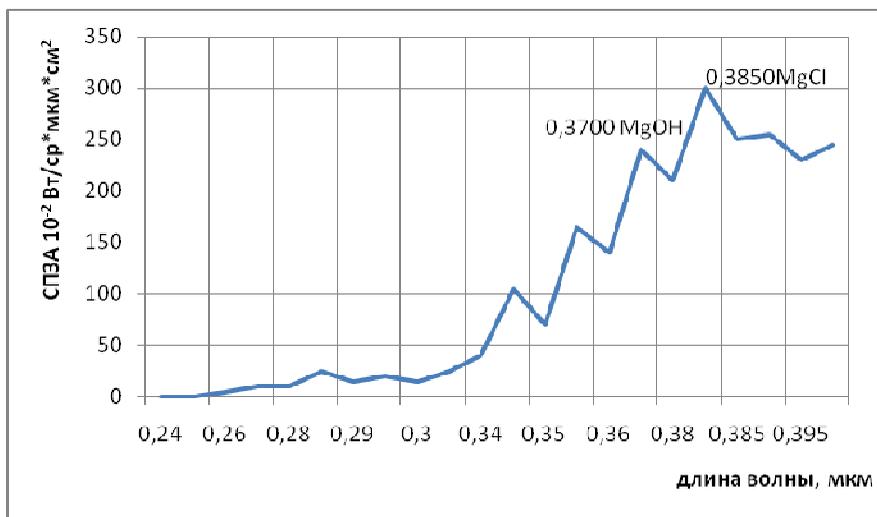


Рис. 49. Распределение спектральной плотности энергетической яркости по длинам волн состава нитрат натрия-магний

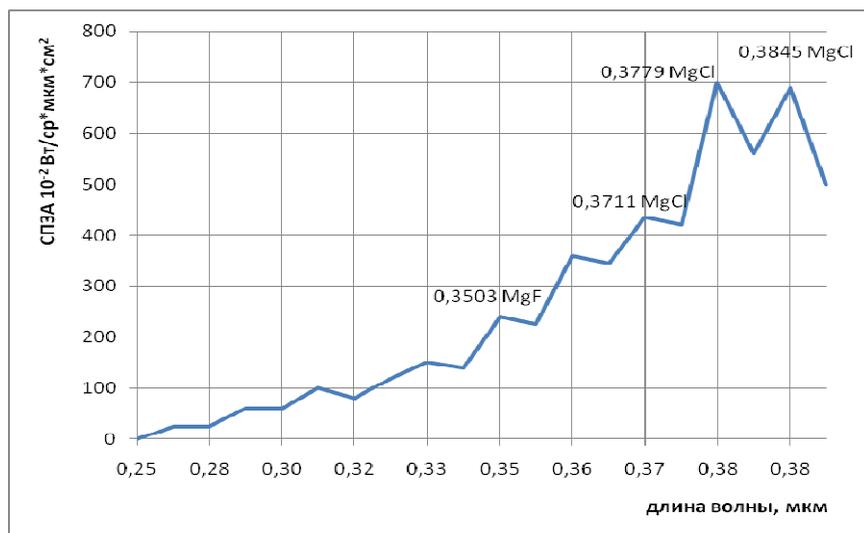


Рис. 50. Распределение спектральной плотности энергетической яркости по длинам волн состава нитрат натрия-магний-Ф-3

На рис. 50 приведены спектры пламен, в продуктах сгорания которых присутствуют одновременно хлориды и фториды металлов. Для исследуемых пламен температура достаточна для обеспечения потенциала возбуждения требуемых продуктов излучения.

В полученных УФ-спектрах не зафиксировано гашение селективных излучателей при их одновременном присутствии в пламени.

В качестве целевых продуктов горения можно рассматривать и продукты горения бора. Были изучены спектры пламен двух вариантов составов:

1) бор вводится в многометальную смесь в качестве добавки (смесь 49%  $\text{NaNO}_3$  + 50%  $\text{Mg}$  + 10%  $\text{B}$ );

2) бор является основным металлическим горючим в смеси с органическим горючим (смесь ПХА – 67%,  $\text{B}$  – 15%, ПДИ-3А – 18%).

В пламенах этих составов создаются разные условия для возбуждения и излучения продуктов горения бора. При идентификации спектров учитывались результаты термодинамического расчета по вероятности образования в пламени следующих продуктов горения:  $\text{BO}$ ,  $\text{BO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ . Доли этих газообразных продуктов горения могут быть разными в зависимости от природы состава и степени участия воздуха.

В ультрафиолетовой области спектра фиксируются интенсивные полосы излучения газообразного  $\text{BO}$  с длинами волн кантов этих полос излучения: 293, 309, 384 нм.

В видимой области спектра идентифицируются полосы излучения  $\text{BO}_2$ .

Полученные данные по спектрам различных пиротехнических пламен в УФ-области спектра показывают присутствие в спектре селективного излучения следующих продуктов сгорания: хлориды и фториды металлов, продукты окисления бора.

### 13 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Качественный спектральный анализ связан с двумя основными операциями: получение спектра и его идентификация.

Спектры пламен можно исследовать визуально, фотографическим и фотоэлектрическим методами. Наибольшее распространение получил фотографический метод, являющийся относительно простым. Фотографический метод позволяет определить с высокой точностью длины волн исследуемых линий и полос в спектре. Для этого рядом с изучаемым спектром пламени с помощью диафрагмы Гартмана фотографируется спектр источника сравнения: ртутно-гелиевая лампа, дуговой спектр железа. Другим преимуществом фотографического метода является его двухмерность, благодаря чему путем фокусировки на щель спектрографа изображения пламени можно исследовать изменение спектра по высоте факела пламени.

Фотоэлектрический метод значительно сложнее фотографического (схема измерения включает усилители, записывающие и механические устройства). В противоположность фотографическому фотоэлектрический метод является одномерным, поэтому для сравнения спектров различных частей пламени необходимо исследовать спектр каждой части отдельно. Преимуществом фотоэлектрической методики является возможность изучения быстрых изменений спектра во времени. При использовании фотоэлектрической регистрации затруднено точное определение длин волн. В качестве внутреннего стандарта целесообразнее использовать любую известную линию в исследуемом спектре.

Для спектроскопических исследований пламен применяются спектрографы с призмой или дифракционной решеткой. При фотографической регистрации спектра призмные спектрографы позволяют получать спектры быстрее, чем приборы с дифракционными решетками, имеющие такую же дисперсию. Для ультрафиолетовой области спектра применяются спектрографы с кварцевой оптикой.

Для исследования быстропротекающих процессов может применяться скоростная спектральная методика. Скоростной

спектральный прибор позволяет за небольшой промежуток времени записывать довольно широкий участок спектра. Время записи спектра на приборе должно быть значительно меньше длительности исследуемого процесса. Основной отличительной особенностью скоростных спектральных приборов является использование в них принципа сканирования, т.е. развертки во времени исследуемого спектра. Регистрация спектров в скоростной спектроскопии может производиться фотоэлектрически и фотографически. Параметры быстродействующих спектрометров в значительной мере определяются выбранным методом сканирования спектра.

Для исследования спектральных характеристик пламен используются скоростные спектрометры ССП-1, ССП-2, ССП-3, ССП-4.

Спектрометры ССП-1, ССП-2 созданы на базе монохроматоров ДМР-4 и системы регистрации информации магнитографом НО62, осциллографами С1-69 и С1-55 со спектральным разрешением 1-2 нм.

Спектрометры ССП-3, ССП-4 разработаны на базе монохроматоров ДМР-2, они позволяют исследовать спектры пламен с высоким разрешением 1-4 Å; в системе регистрации применяется магнитограф НО62, цифровой мультиметр Ф 480 и осциллографы С1-69 и С1-55.

Исследование спектров излучения пламен в инфракрасной области 1-5 мкм обеспечивается спектрорадиометром БРС-1.

В работе используется фотографический метод регистрации спектра. Для фотографирования применяются фотопластины или фотопленки с достаточно высокой чувствительностью в данной области спектра. Съемка спектров пламени производится с помощью спектрографов. Основными оптическими характеристиками спектрографа являются линейная дисперсия, разрешающая способность и светосила.

**Линейная дисперсия**  $D_1$  определяет расстояние в фокальной плоскости прибора между двумя монохроматическими лучами  $I_1$  и  $I_2$ , отнесенное к разности их длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ :

$$D_1 = \frac{l_1 - l_2}{\lambda_1 - \lambda_2} = \frac{\Delta l}{\Delta \lambda}. \quad (13)$$

Обычно применяется обратная величина  $D=1/D_1(\text{Å}/\text{мм})$ . Дисперсионная кривая представляет графическую зависимость расстояния от начала спектра до данной спектральной линии от длины волны (рис. 51). Каждая спектральная линия занимает в фокальной плоскости прибора определенное положение соответственно ее длине волны: зная положение линии в фокальной плоскости, можно по дисперсионной кривой вычислить длину волны. Дисперсия призмных оптических приборов зависит от дисперсии материала призмы. У призмных приборов дисперсия для красной части спектра меньше, чем для фиолетовой.

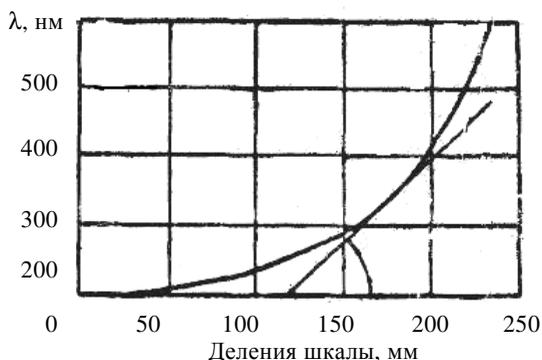


Рис. 51. Дисперсионная кривая

**Разрешающей способностью** спектрографа называется его способность различать (разрешать) две близко расположенные линии равной интенсивности. Разрешающая способность призмного спектрографа зависит от ширины щели и разрешающей способности призмы. Спектральные линии – это монохроматическое изображение щели. Ширина спектральной линии зависит от ширины щели спектрографа. Но существует предельная ширина щели, начиная с которой ширина изображения линии остается постоянной. Эта ширина щели называется нормальной. Уменьшение ширины щели спектрографа меньше нормальной, не приведет к увеличению разрешающей силы прибора.

**Светосила прибора** определяет эффективность использования света спектральным прибором. В общем случае светосила прибора зависит от светосилы оптики и характеристик прибора.

### 13.1 Измерение длин волн

Для определения длин волн при качественном анализе пользуются спектрами сравнения (хорошо изученными спектрами элементов с большим числом линий). Как правило, спектром сравнения служит спектр железа (спектр – нормаль).

**Спектр железа** содержит большое число линий, достаточно равномерно заполняющих всю видимую и ближнюю ультрафиолетовую области спектра. Длины волн линий железа тщательно измерены и существуют специальные атласы дуговых и искровых спектров железа с указанием длин волн и разметкой последних линий большинства элементов. Применение такого атласа облегчает идентификацию линий и полос. Удобнее пользоваться атласом, полученным на приборе с таким же диспергирующим элементом, как на используемом в работе спектральном приборе. Очень удобным для работы является атлас железной дуги, составленный С.К. Калининым. Он содержит увеличенные фотографии дугового и искрового спектров железа в интервале длин волн от 208,3 до 656,2 нм. Спектры сняты на кварцевом спектрографе ИСП-30. Для удобства пользования атласом спектр железа распределен на наборе планшеток. В атласе указана длина волны каждой линии железа. Каждая планшетка включает определенный участок спектра. Для других спектрографов, например ИСП-51, имеются аналогичные атласы в виде планшеток с увеличенными фотографиями спектра железа (Приложение 2, 3).

Для использования спектра железа в качестве шкалы длин волн необходимо хорошо ориентироваться в этом спектре. При изучении спектра железа полезно запомнить некоторые характерные группы линий в различных областях спектра. Характерные группы линий можно выделять по яркости линий, расстоянию между ними и числом линий в каждой группе. Эта характерная группа линий позволяет найти нужный планшет в справочном атласе. По этой же группе

линий определяется диапазон спектра, в котором располагаются идентифицируемые линии. На каждом планшете есть своя отличительная особенность в расположении и количестве спектральных линий. Например, характерная группа линий в области 310 нм. Одна линия – 310 нм (триплет) очень интенсивная и рядом с ней четыре линии примерно на одинаковом расстоянии друг от друга. В зависимости от области спектра можно за начало отсчета выбрать расположенную в этой части спектра характерную группу линий.

Так, в видимой области спектра лучше всего ориентироваться по группе линий 640 нм, состоящей из пяти близко расположенных линий и далее очень интенсивной линии 640 нм (Приложение 3).

Для отождествления линии в спектре исследуемого источника необходимо произвести следующие операции:

1. Спроектировать спектрограмму источника со снятым рядом дуговым спектром железа на экран спектропроектора;

2. Определить область спектра, в которой расположена идентифицируемая линия в спектре источника;

3. Отыскать в атласе планшет, содержащий соответствующий участок спектра железа;

4. Положить планшет на экран спектропроектора так, чтобы линии одинаковой длины волны в спектре железа на экране и на планшете совпадали;

5. Установить, с какой из линий элементов, отмеченных на планшете, совпадает исследуемая линия.

Для более точного определения длины волны неизвестной линии или полосы в исследуемом спектре можно рассчитать их значения. Если использовать нормаль в качестве спектра сравнения, то при постоянной линейной дисперсии прибора для определения длины волны неизвестной линии достаточно измерить расстояние между двумя известными линиями в спектре нормали и расстояние от одной из них до измеряемой линии. Для определения длины волны  $\lambda$  неизвестной линии в спектре нормали выбираются две резкие линии так, чтобы анализируемая линия лежала между ними. Если линии выбраны достаточно близко к анализируемой, то можно считать, что на протяжении этого участка, где лежат эти три линии, дисперсия

прибора остается постоянной. Обратную дисперсию прибора в этом участке спектра легко найти по линиям с известной длиной волны:

$$\frac{\hat{\alpha}\lambda}{\hat{\alpha}l} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\alpha_2 - \alpha_1}, \quad (14)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – отсчеты прибора, измеряющего расстояние между линиями, для первой и второй линии.

Если для неизвестной линии получен отсчет  $\alpha_x$ , то ее длина волны больше, чем длина волны первой линии, на  $(\alpha_x - \alpha_1) \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\alpha_2 - \alpha_1}$  и, следовательно, ее длина волны

$$\lambda_x = \lambda_1 + (\alpha_x - \alpha_1) \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\alpha_2 - \alpha_1} = \lambda_1 + \frac{x(\lambda_2 - \lambda_1)}{\alpha}, \quad (15)$$

где  $x = \alpha_x - \alpha_1$  – расстояние от первой линии до анализируемой;  $\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$  – расстояние между линиями, которые выбраны в качестве нормалей.

Эта формула называется формулой Гартмана. Интервал, на котором можно пользоваться интерполяционной формулой, зависит от требуемой точности определения длин волн. Формула Гартмана дает лучшие результаты, если измеряемые линии лежат внутри интервала  $\lambda_1 - \lambda_3$  и линия  $\lambda_2$  лежит примерно посередине между  $\lambda_1$  и  $\lambda_3$ . Если  $\lambda_2$  лежит близко к  $\lambda_1$  или  $\lambda_3$ , то снижается точность определения констант формулы.

**Описание установки.** Съёмка спектров в видимой области производится с помощью спектрографа со стеклянной оптикой (например, ИСП-51), а в ультрафиолетовой области – кварцевого спектрографа (например, ИСП-30).

Основное назначение спектрального прибора – разложить в спектр излучение источника и выделить соответствующие монохроматические составляющие излучения. Основные части спектрального прибора – щель, диспергирующая и оптическая системы. В качестве диспергирующей системы используются призмы различной формы, изготавливаемые из стекла, кварца или флюорита, в зависимости от области исследуемого спектра.

Спектрограф ИСП-51 имеет рабочий диапазон 360-1000 нм и состоит из следующих частей (рис. 52): коллиматора со щелью; призм; камеры с объективом и кассетной частью, в которой крепится кассета с фотопластинкой.

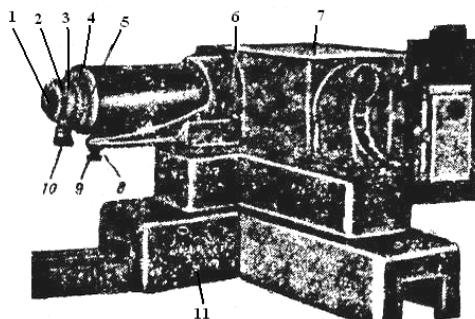


Рис. 52. Общий вид спектрографа ИСП-51:

- 1 – насадка на щели; 2 – штифт регулировки насадки;
- 3 – щель; 4 – кольцо фокусировки коллиматора;
- 5 – шкала; 6 – крышка винтов регуляторов; 7 – корпус;
- 8 – крепежная гайка; 9 – винт перемещения коллиматора;
- 10 – микрометрический винт; 11 – станина.

Диспергирующая система прибора состоит из трех стеклянных призм. Оптическая схема прибора приведена на рис. 53. На барабане кассетной части камеры имеется плато с направляющими, по которым перемещается рамка с кассетой (6,5x9 или 6,5x18) в зависимости от камеры. Положение рамки контролируется по шкале, расположенной слева на плато. На кассетной рамке клиновым зажимом укрепляется кассета или рамка с матовым стеклом для визуального наблюдения спектра.

Фокусировка прибора осуществляется перемещением объективов коллиматора и камеры. Перемещение контролируется по шкале. Угол наклона кассеты устанавливается разворотом барабана, на котором укреплена кассета. Время от времени перед началом съемки проводится проверка фокусировки по матовому стеклу. Линии спектра, получаемые на фотопластинке, являются изображением щели

спектрографа. Положение кассеты контролируется по шкале на кассетной рамке.

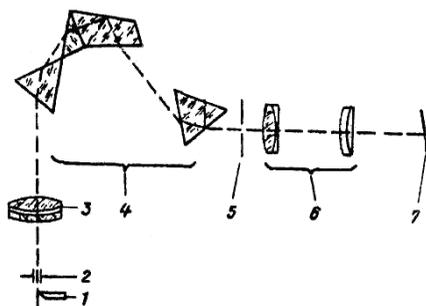


Рис. 53. Оптическая схема спектрографа ИСП-51: 1 – призма сравнения; 2 – щель коллиматора; 3 – объектив; 4 – диспергирующая система 5 – съемная диафрагма; 6, 8 – объективы камеры; 7 – кассета

Спектрограф ИСП-30 на рис. 54 построен по оригинальной зеркально – линзовой схеме, достигается практически плоская фокальная поверхность на протяжении всей рабочей области спектра (200-600 нм).

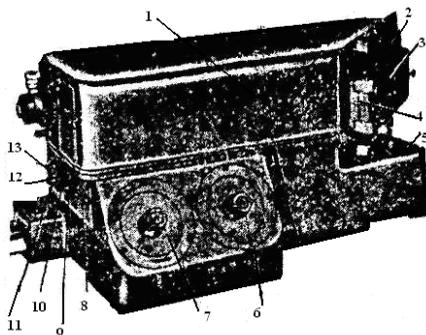


Рис. 54. Общий вид спектрографа ИСП-30:

- 1 – кожух; 2 – зажим кассеты; 3 – кассета; 4 – шкала подъема кассеты;
- 5, 12 – сигнальные лампочки; 6 – реле времени; 7 – реле; 8 – тумблер «пуск»;
- 9 – переключатель передвигки кассеты; 10 – переключатель шага кассеты;
- 11 – выключатель затвора; 13 – выключатель сети.

Оптическая схема прибора приведена на рис. 55. Спектрограф ИСП-30 имеет реле времени, с помощью которого автоматически выдерживается время экспозиции.

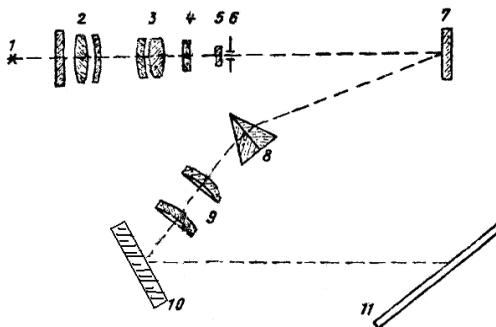


Рис.55. Оптическая схема спектрографа ИСП-30:

1 – источник излучения; 2, 3, 4 – конденсоры; 5 – ступенчатый ослабитель; 6 – щель; 7 – зеркальный объектив; 8 – призма; 9 – объектив; 10 – зеркало; 11 – кассета

Кассета укрепляется на рамке с помощью клинового зажима. В вертикальном направлении рамка перемещается с помощью электродвигателя, укрепленного в основании прибора. Для подъема и опускания кассетной рамки при работе без реле времени служит переключатель 9. Однократным нажатием на переключатель рамку с кассетой можно переместить на 1 или 2 мм. Величина перемещения устанавливается переключателем 10. Отсчет производится по шкале 4. Кассета рассчитана на фотопластинку 9x24 см, но допускает также установку пластинок меньшей длины. Для отсчета положения кассеты имеется шкала, расположенная справа на кассетной рамке.

Ответственной частью спектрографов является щель. В спектрографах применяются симметричные щели, ширину которых можно регулировать, центр щели не смещается. Щель образована двумя металлическими ножами, которые перемещаются в направляющих. Ножи имеют срез по ходу распространения луча, для того чтобы расходящийся после щели световой пучок не попадал на их стенки. Раскрытие щели осуществляется с помощью

микрометрического винта с ценой деления 0,001 мм. При вывертывании микрометрического винта ножи сдвигаются под действием пружины. Края щели должны быть ровные.

Перед щелью устанавливается диафрагма (диафрагма Гартмана), которая позволяет ограничить ее высоту, а также фотографировать спектр через разные по высоте участки щели (рис. 56). Левый фигурный вырез служит для ограничения высоты щели. Его левая часть закрывает щель сверху и снизу, оставляя открытой середину.

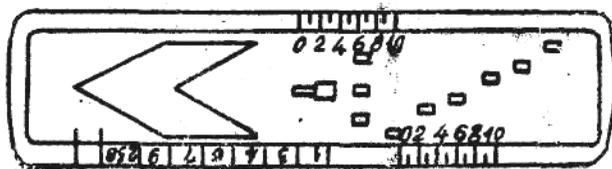


Рис. 56. Фигурная диаграмма Гартмана

Положение выреза перед щелью контролируется по верхней шкале. Одно деление соответствует высоте щели 1,2 мм. Правая часть выреза закрывает среднюю часть щели, оставляя открытой верхнюю и нижнюю части ее. Положение этого выреза контролируется по правой нижней шкале. Отсчеты по обеим шкалам читаются против края корпуса щели. Левая часть выреза позволяет фотографировать в средней части щели исследуемый спектр, а правая часть выреза (сверху и снизу) – спектр сравнения, например, спектр железа. Два выреза, расположенные в средней части диаграммы, ограничивают высоту щели в ее центральной части. Устанавливаются вырезы по двум длинным штрихам, расположенным в левой нижней части диафрагмы.

В правой части диафрагмы расположены ступенчатые вырезы. Устанавливая ступени перед щелью по шкале, можно получить на фотопластинке девять соприкасающихся спектров одинаковой высоты. Второй, пятый и восьмой спектры фотографируются одновременно. При работе со ступенчатым вырезом следует

повернуть диафрагму на  $180^\circ$  и читать отсчеты против края корпуса насадки на щель.

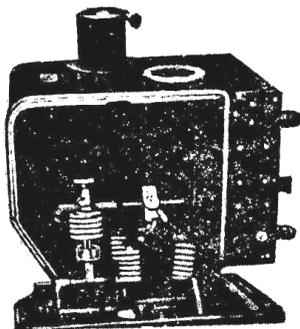


Рис. 57. Типовой штатив

Для получения спектра нормали железной дуги применяется дуга между железными электродами (рис. 57). Источником возбуждения является дуговой генератор ДГ-2. Железные электроды укрепляются в штативе, который устанавливается и закрепляется на рельсе спектрографа. В штативе есть зажимы для электродов, которые изолированы друг от друга и от корпуса штатива.

Предусмотрено перемещение электродов относительно друг друга, что позволяет установить с помощью шаблона аналитический промежуток.

Для установки центра аналитического промежутка на оптической оси спектрального аппарата в штативе предусмотрено совместное перемещение электродов в одном или двух направлениях, перпендикулярных оптической оси. Электроды можно перемещать только при выключенном генераторе. При установке штатив с электродами располагается по возможности ближе, чтобы межэлектродный промежуток находился против центра крышки щели (на оптической оси спектрографа). Далее штатив отодвигается от щели на требуемое расстояние.

**Методика проведения работы.** После установки штатива с железными электродами на оптической оси на рельсы между щелью и дугой помещаются конденсоры с фокусными расстояниями 73 и 192 мм для ИСП-51 и конденсоры с фокусными расстояниями 150 и 75 мм для ИСП-30.

Включается дуга и проверяется равномерность освещения щели: световое пятно должно располагаться симметрично относительно перекрестия на крышке щели. Перед щелью устанавливается диафрагма Гартмана тремя вырезами одновременно.

Съемка каждого спектра производится при определенных ширине щели и времени экспозиции (например, при ширине щели 0,013 мм время экспозиции для железной дуги 0,5 с). Перед съемкой открывается щель спектрографа и на матовом стекле кассетной части проверяется четкость спектра. После проверки щель закрывается крышкой.

При свете нужно ознакомиться с устройством кассеты спектрографа и потренироваться в ее зарядке. Зарядается кассета пленкой в темноте. Пленка кладётся эмульсией вниз, тщательно выравнивается и закрывается крышка кассеты. Кассета устанавливается на рамке в камерной части спектрографа, закрепляется на спектрографе и открывается шторка с передней стороны кассеты. Снимается крышка со щели спектрографа и в момент истечения времени экспозиции закрывается.

При работе с дугой необходимо соблюдать следующие меры предосторожности:

- запрещается работа с железной дугой без темных очков;
- перед включением в сеть спектрографа и дугового генератора необходимо проверить исправность проводки и наличие заземления;
- при работе генератора нужно постоянно следить за показаниями приборов, регистрирующих параметры железной дуги;
- категорически воспрещается прикасаться к токонесущим частям держателя электродов при высоком напряжении. Это опасно для жизни;
- положение электродов можно подправлять только при выключенном генераторе.

**Съемка спектра пламени исследуемого ПС.** Пирозлементы неизвестного пиротехнического состава выдаются лаборантам. Преподаватель при выдаче задания уточняет условия съемки (ширину щели и время экспозиции), какая зона пламени в начальный момент должна располагаться на оптической оси и на каком спектрографе производить съемку. В соответствии с полученным заданием образец устанавливается в вертикальной камере сжигания на продолжении оптической оси. Съемка производится через вырезы диафрагмы Гартмана так, чтобы исследуемый спектр разместился между

спектрами железа (вырезы 4 или 6). Щель открывается после сгорания воспламенительного состава, чтобы его продукты не накладывались на спектр пламени пиротехнического состава и в момент истечения времени экспозиции закрывается. Закрывается кассета. Пленка проявляется в полной темноте, фиксируется и тщательно промывается в проточной воде. Спектрограмма высушивается и на ней подписываются дата съемки и номер опыта.

**Обработка спектрограммы.** Производится идентификация спектральных линий и полос в спектре пламени пиротехнического состава. Удобно рассматривать спектры с помощью спектропроекторов.



Рис. 58. Общий вид спектропроектора ПС-18

Спектропроектор типа ПС-18 (рис. 58) применяется для рассматривания полученных спектров в увеличенном (в 20 раз) виде и для их расшифровки. Расшифровка спектра производится следующим образом. Для работы со спектропроектором применяются атласы спектра железа, которые сняты на спектрографе и увеличены в 20 раз. Поэтому на планшетах этого атласа спектр железа выглядит точно таким, каким он представлен на экране спектропроектора.

Нужная область спектра железа находится по характерным группам линий. При расшифровке неизвестного спектра на экране спектропроектора накладываем соответствующую планшета атласа так, чтобы линии железа в изображении спектра совпали с линиями атласа. От найденных линий железа в спектре нормализуем отсчет неизвестных линий в исследуемом спектре.

Для увеличения спектра и измерения расстояний между спектральными линиями служат компараторы, например, горизонтальный компаратор ИЗА-2 (рис. 59).

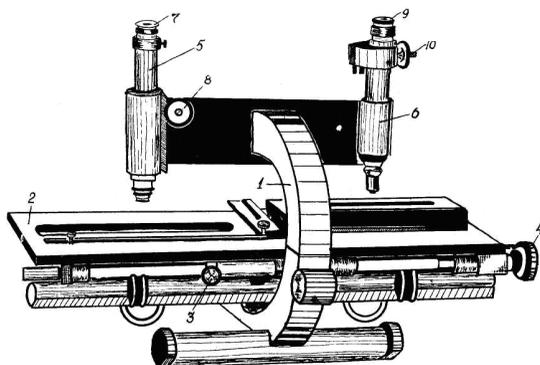


Рис. 59. Устройство горизонтального компаратора ИЗА-2

Компаратор ИЗА-2 служит для измерения длин в пределах от 0 до 200 мм с точностью до 0,001 мм. Он состоит из массивного основания (1), вдоль которого движется предметный столик (2). Грубое перемещение столика производится от руки, для чего предварительно освобождают стопорный винт (3). Тонкая подача осуществляется микрометрическим винтом (4) при закреплении столика винтом (3). В верхней части прибора укреплены два микроскопа: визирный (5) и отсчетный (6). В нижней части прибора под микроскопами находятся два зеркала, служащие для освещения отсчетной шкалы и измеряемого объекта. Каждое зеркало имеет по две отражающих поверхности: плоскую с зеркальным отражением и сферическую матовую с рассеивающим отражением. Первая употребляется при рассеянном, например, дневном свете, вторая – при сосредоточенном, например, лампа накаливания. Измерение расстояний на компараторе производится в следующем порядке.

Помещаем на предметный столик под визирный микроскоп спектрограмму так, чтобы ось длин волн располагалась вдоль направления перемещения столика. При такой установке перемещение предметного столика не приводит к сдвигу спектра, видимого в окуляр визирного микроскопа. Если спектр и отсчетные шкалы видны слабо или неравномерно освещенными, то поворотом зеркал, расположенных под микроскопами, следует добиться наилучшей освещенности. Для получения резкого изображения спектрограммы и

окулярного креста при наблюдении через визирный микроскоп следует вначале вращением окуляра (7) добиться резкого изображения креста, а затем, перемещая визирный микроскоп, вращением маховика (8) добиться резкого изображения спектра. Резкость шкалы отсчетного микроскопа устанавливается вращением окуляра отсчетного микроскопа (9). Далее следует установить пересечение окулярного креста на одну из измеряемых линий. Для этого, открепив винт (3), перемещаем предметный стол до тех пор, пока измеряемая линия не попадет в поле зрения визирного микроскопа. Затем винт стопорится, и при помощи маховика (4) производится точная наводка линии на центр окулярного креста. После этого производится отсчет по отсчетному микроскопу.

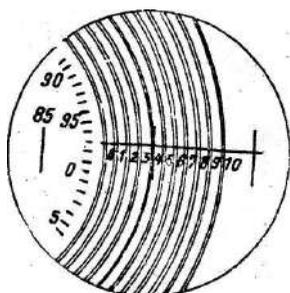


Рис. 60. Поле зрения микроскопа компаратора

Поле зрения второго микроскопа приведено на рис. 60. В поле зрения одновременно видны два-три штриха миллиметровой шкалы, обозначенные крупными цифрами 83, 84, 85, неподвижная шкала десятых долей миллиметра с делениями от 0 до 10, круговая шкала для отсчета сотых и тысячных долей миллиметра и десять двойных витков спирали. Чтобы произвести отсчет, необходимо предварительно маховичком подвести двойной виток спирали так, чтобы миллиметровый штрих,

находящийся в зоне двойных витков, оказался точно посередине между линиями витка. Индексом для отсчета миллиметровых делений шкалы является нулевой штрих неподвижной шкалы десятых долей миллиметра. Если в поле зрения окуляра штрих миллиметровой шкалы расположен справа от индекса, то это означает, что данный миллиметровый штрих уже прошел индекс, а ближайший миллиметровый штрих еще не дошел до индекса. В данном случае отсчет целых – 84 мм. Отсчет десятых долей миллиметра в этом отрезке показывает цифра последнего пройденного штриха десятых долей миллиметра. Сотые и тысячные доли миллиметра отсчитываются одновременно по круговой шкале: индексом для

отсчета служит указатель шкалы. Цена деления круговой шкалы – 0,001 мм. В приведенном примере отсчет 84,3990.

Дальше вводится следующая линия в центр между штрихами первого микроскопа и вновь производится отсчет по микроскопу. Разность отсчетов есть расстояние между линиями. По измеренным расстояниям вычисляются длина волны неизвестной линии по формуле Гартмана. Идентификация излучателей производится сравнением измеренных длин волн с табличными.

Наиболее существенным этапом спектроскопических измерений является расшифровка спектрограмм – установление принадлежности имеющихся в спектре линий и полос тем или иным состояниям атомов и молекул.

Существует целый ряд таблиц различной степени полноты. Для атомных спектров – «Таблицы спектральных линий» авторы А.Н. Зайдель, В.К. Прокофьев и др.; для молекулярных спектров – «Отождествление молекулярных спектров» авторы Р.Пирс и А.Гейдон. Назначение этих таблиц – облегчить отождествление спектров.

Таблицы молекулярных спектров для удобства пользования разделены на две части (Приложение 5). В первой части книги приведены длины волн устойчивых кантов полос всех молекул, включенных в таблицы. Под термином «устойчивые» понимаются канты наиболее интенсивных систем полос, легче всего появляющихся в спектре при разнообразных способах возбуждения спектра. Эти канты являются, таким образом, наиболее характерными для каждой данной молекулы, играя роль, аналогичную «последним линиям» в атомных спектрах. Таблица составлена в порядке убывания длин волн, сопровождается значениями интенсивности канта в наиболее типичных источниках и указаниями о виде канта. Таким образом, эта часть книги позволяет быстро ориентироваться в неизвестном спектре и определить молекулы, присутствие которых в данном случае возможно.

Вторая часть книги содержит длины волн, значения интенсивностей и полное описание вида и условий появления всех систем полос каждой индивидуальной молекулы. Установив с помощью первой части книги возможность присутствия тех или иных

молекул по наиболее характерным полосам, можно, пользуясь второй частью книги, сопоставить с изучаемым спектром все известные системы полос этих молекул, и таким образом, с большей степенью достоверности решить вопрос об их присутствии или отсутствии в изучаемом пламени.

Общие соображения, побудившие авторов к такому разделению материала, сводятся вкратце к следующему. По практическим причинам, предпочтительно устанавливать участие в данном спектре наличие той или иной молекулы, отождествляя системы полос, а не отдельные полосы. Для атомных спектров также отождествляют линию за линией, пользуясь таблицами атомных линий, расположенных по длинам волн.

Каждое изменение электронного состояния в атоме вызывает возникновение линии, тогда как каждое изменение электронного состояния в молекуле вызывает возникновение системы полос. Различные полосы системы возникают вследствие изменений колебательного состояния молекулы, которое, как правило, соответствует гораздо меньшим изменениям энергии молекулы, чем изменения электронного состояния. Поэтому при переходе от одного источника к другому полосы определенной системы обнаруживают в своем поведении некоторое сходство с компонентами узкого мультиплета, появляясь и исчезая одновременно. Но в то время, как мультиплет содержит относительно небольшую часть линий всего спектра, отдельная система полос зачастую состоит из нескольких сотен полос и может охватывать все обычно возбуждаемое излучение данной молекулы. Включение всех таких полос в один список приводит к большому числу совершенно случайных совпадений по длинам волн. Такие совпадения причиняют большие неудобства в случае полос, чем в случае линий, так как определяемая длина волны канта полосы в очень большой степени зависит от применённой дисперсии и суждения наблюдателя. Таким образом, отождествление отдельной полосы только по длине волны гораздо менее надежно, чем такого же рода отождествление отдельной линии. Поэтому отождествление всякий раз должно быть дополнительно чем-либо подкреплено. Это дополнительное подтверждение может быть

получено при рассмотрении системы как целого. Длина волны канта самой интенсивной полосы неизвестной системы сопоставляется с таблицей, и близкое совпадение по длине волны и по направлению отклонения позволяет предположить, что эта полоса является членом определенной системы данной молекулы. Затем обращаются к таблице систем этой молекулы и проверяют присутствие или отсутствие в спектре других ее членов.

Затем эта операция повторяется с наиболее интенсивной из оставшихся неотожествленными полос и т.д. Рекомендуется также просмотреть другие системы обнаруженных молекул и системы других молекул, содержащих те же элементы. Например, если обнаружены система, принадлежащая  $C_2$ , и система  $N_2$ , то следует попытаться обнаружить системы  $CN$ , а также другие системы с  $N_2$  и  $C_2$ . Или, если предполагается присутствие кислорода, то следует просмотреть системы  $NO$  и  $CO$ .

Таким путем удастся обнаружить слабые полосы, маскируемые более яркими, могущие иначе остаться незамеченными. Для такого рода прослеживания и, во всех случаях, когда интерес сосредоточивается на спектре данной молекулы, материал второй части оказывается особенно удобным. В случае проведения качественного анализа пламен пиротехнических смесей полезно знать состав входящих в нее компонентов, что, в свою очередь, позволит предположить наличие возможных продуктов сгорания в пламени. Кроме того, следует учитывать возможность присутствия атомных линий по таблицам «последних» линий элементов.

В табл. 21 приведены наиболее чувствительные атомные линии. Для элементов, обладающих простым, легко возбуждаемым спектром, как например,  $Na$ ,  $Ca$ ,  $Al$ , интенсивности даны по десятибалльной шкале (с баллом 10 для наиболее интенсивной линии). Для элементов с трудно возбудимыми спектрами, например для неметаллических элементов,  $O$ ,  $Cl$ , интенсивности даны по пятибалльной шкале (наиболее интенсивная линия оценена баллом 5). Линии, легко наблюдаемые в поглощении, обозначены буквой  $a$ .

## Устойчивые атомные линии

Al	Интенсивность, J	Ca	Интенсивность, J	K	Интенсивность, J	Na	Интенсивность, J
3961,54	10a	5602,84	5	7698,98	10a	5895,93	9a
3944,02	9a	до		7664,91	10a	5889,96	10a
3092,72	8a	5581,96		4047,22	9a	3302,94	4a
3082,16	8a	5270,27	4	4044,16	9a	3302,34	4a
<b>B</b>		до		<b>Mg</b>		<b>Sr</b>	
2497,73	5	5261,70		5183,62	8	4962,26	3
2496,78	4	4454,78	8	5172,68	7	4872,49	2
<b>Ba</b>		4434,96	7	5167,33	6	4832,08	5
5777,7	9	4425,44	6	3838,26	7	4607,33	10
5535,53	10a	4318,65	6	3832,31	6	<b>Zr</b>	
5519,11	6	до		3096,92	8	4710,07	1
3421,0	8	4283,10		2852,13	10a	4687,80	2
		4226,73	10a			3601,19	5
						3547,68	3
						3519,61	2
						3481,15	1

При отождествлении линейчатых спектров более исчерпывающим образом необходимо пользоваться различными существующими таблицами атомных линий.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шидловский, А. А. Пиротехника в народном хозяйстве / А. А. Шидловский, А. И. Силин. – М. : Машиностроение, 1978. – 232 с.
2. Шидловский, А. А. Основы пиротехники /А. А. Шидловский. – М. : Машиностроение, 1964. – 319 с.
3. Краткая энциклопедия по пиротехнике / под ред. Ф. П. Мадыкина. – Казань, 1999. – 244 с.
4. Мадыкин, Ф. П. Пиротехнические составы цветных огней / Ф. П. Мадыкин. – Казань : Изд-во КГТУ, 1999. – 205 с.
5. Мадыкин, Ф. П. Сигнальные и фейерверочные составы и изделия: учебное пособие / Ф. П. Мадыкин, Н. А. Тихонова, О. Ф. Тютюнник. – Казань : Изд-во КГТУ, 2005. – 148 с.
6. Пороха, топлива, заряды / В. А. Аликин [и др.]. – М. : Химия, 2004. – 202 с.
7. Цветовое оформление на железнодорожном транспорте / Т. Л. Соснова [и др.]. – М. : Транспорт, 1984. – 200 с.
8. Общедоступная пиротехния. Т.7. / под ред. акад. Н. М. Вареных. – Сергиев Посад, 2008. – 288 с.
9. Приборно-методическое обеспечение испытаний металлизированных гетерогенных конденсированных систем : каталог / под ред. Н. А. Силина. – М. : ЦНИИНТИ, 1982. – 123 с.
10. Кривошеев, М. И. Цветовые измерения / М. И. Кривошеев, А. К. Кустарев. – М. : Энергоиздат, 1990. – 240 с.
11. Соколов, Е. Н. Цветовое зрение / Е. Н. Соколов, И. А. Измайлов. – М. : МГУ, 1984. – 175 с.
12. Ломоносова, Л. С. Спектральный анализ / Л. С. Ломоносова, О. Б. Фалькова. – М. : Науч.-техн. изд-во, 1958. – 420 с.
13. Шленский, О. Ф. Режимы горения материалов / О. Ф. Шленский, В. С. Сиренко, Е. А. Егорова – М. : Машиностроение, 2011. – 218 с.
14. Зайдель, А. Н. Основы спектрального анализа / А. Н. Зайдель. – М.: Наука, 1965. – 322 с.
15. Зайдель, А. Н. Таблицы спектрального анализа / А. Н. Зайдель, В. К. Прокофьев, С. М. Райский [и др.] – М.: Наука, 1969. – 782 с.
16. Гейдон, А. Спектроскопия и теория горения / А. Гейдон. –

М.: ИЛ, 1950. – 307 с.

17. Пирс, Р. Отождествление молекулярных спектров / Р. Пирс, А. Гейдон. – М.: ИЛ, 1949. – 240 с.

18. Микрофотометр регистрирующий ИФО-451. Техническое описание и инструкция по эксплуатации, 1974. – 27с.

19. Шашлов, Б. А. Цвет и цветовоспроизведение / Б. А. Шашлов. – М.: Книга, 1986.

20. Тарасевич, Н. И. Методы спектрального и химико-спектрального анализа / Н. И. Тарасевич, К. А. Семененко, А. Д. Хлыстова – М. : Изд-во МГУ, 1973. – 275 с.

21. Полуэктов, Н. С. Методы анализа информации по фотометрии пламени / Н. С. Полуэктов. – М.: Науч.-техн. изд-во, 1959. – 230 с.

22. Энергии разрыва химических связей, потенциалы ионизации и сродство к электрону / А. В. Гурвич [и др.]. – М. : Наука, 1974. – 351 с.

23. Douda, В.Е. Emission Studies of Selected Pyrotechnic Flames. Journal of the Optical Society of America, 1965. - V.55. - № 7. - P.787-793.

24. Douda, В.Е. Visible Radiation from illuminating-Flare Flames: Strong Emission Features // В. Е. Douda, R.M. Blunt and E.J. Bair - Journal of the Optical Society of America, 1970.-V.60.- №8.- P.I 116-1119.

25. Ingram, В.В. Color Purity Measurements of Traditional Star Formulas - Journal of Pyrotechnics, 2003. -№ 17.

26. Фристрам, Р. М. Структура пламени / Р. М. Фристрам – М. : Металлургия, 1969. – 363 с.

27. Хацринов, А. И. Пламя: учебное пособие / А. И. Хацринов, Г. С. Батурова, Н. Х. Валеев. – Казань : КГТУ, 1999. – 205 с.

28. Международный светотехнический словарь. – 3-е изд., Вып. 1. – М., 1971. – 84 с.

29. Крикунов, Д. З. Справочник по основам инфракрасной техники / Д. З. Крикунов – М. : Сов. радио, 1978. – 400 с.

30. Жиров, Н. Ф. Свечение пиротехнического пламени / Н. Ф. Жиров – М. : Оборонгиз, 1939. – 145 с.

31. Похил, П. Ф. Методы исследования процессов горения и детонации / П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, В. М. Зайцев – М. : Наука, 1969. – 302 с.

32. Полетаев, Н. И. Излучательные характеристики пылевого факела алюминия. Конденсированная фаза / Н. И. Полетаев, А. В. Флорко // Физика горения и взрыва. – 2007. – №4(Т.43). – С. 49-58.

33. Полетаев, Н.И. Спектральные исследования газового компонента пылевого факела частиц алюминия / Н. И. Полетаев, А. В. Флорко // Физика горения и взрыва. – 2008. – №4(Т.44). – С. 72-79.

34. Щепина, Н. С. Основы светотехники / Н. С. Щепина – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 344 с.

35. Гуторов, М. М. Основы светотехники и света / М. М. Гуторов. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 380 с.

36. Блох, А. Г. Теплообмен излучением: справочник / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.

37. Энергии разрыва химических связей, потенциалы ионизации и сродство к электрону / Л.В. Гурвич [и др.]. – М. : Наука, 1974. – 351 с.

## Приложение 1

### ОПИСАНИЕ СПЕКТРОГРАММ

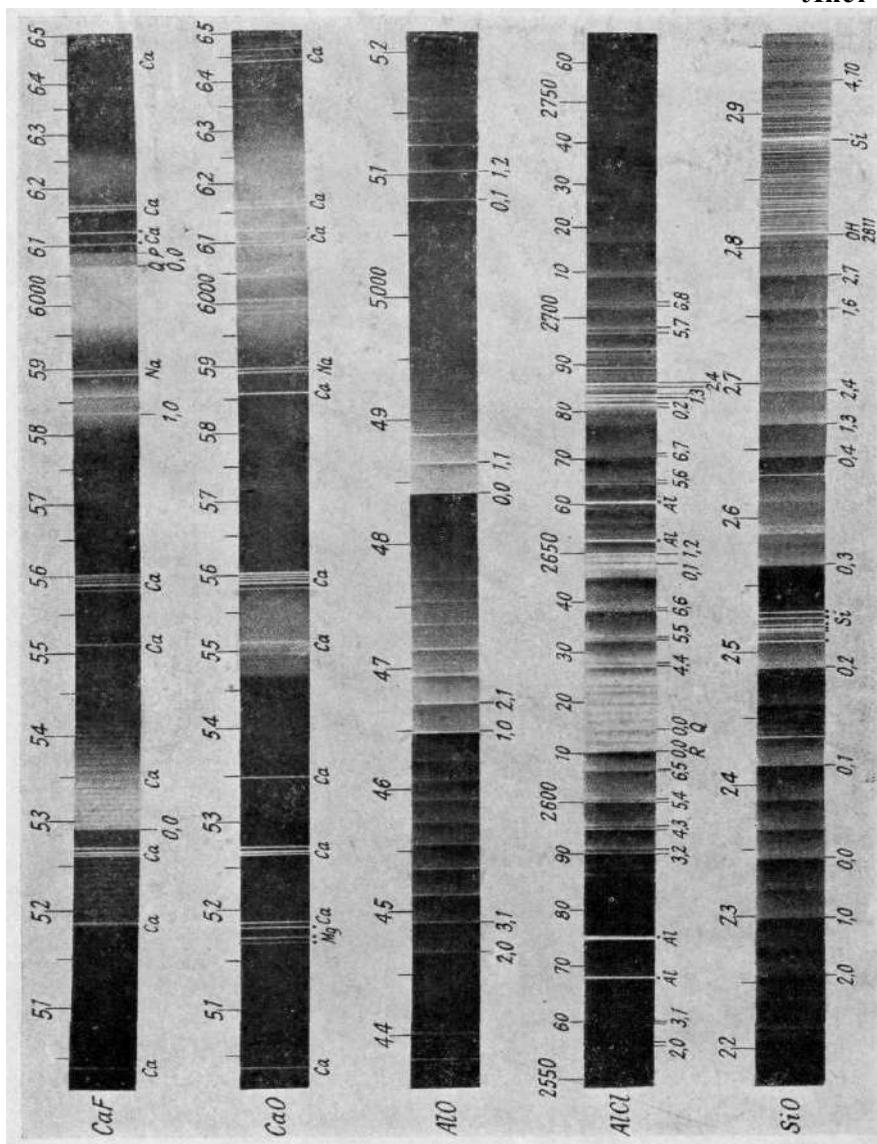
Ниже даны краткие указания об условиях получения спектрограмм.

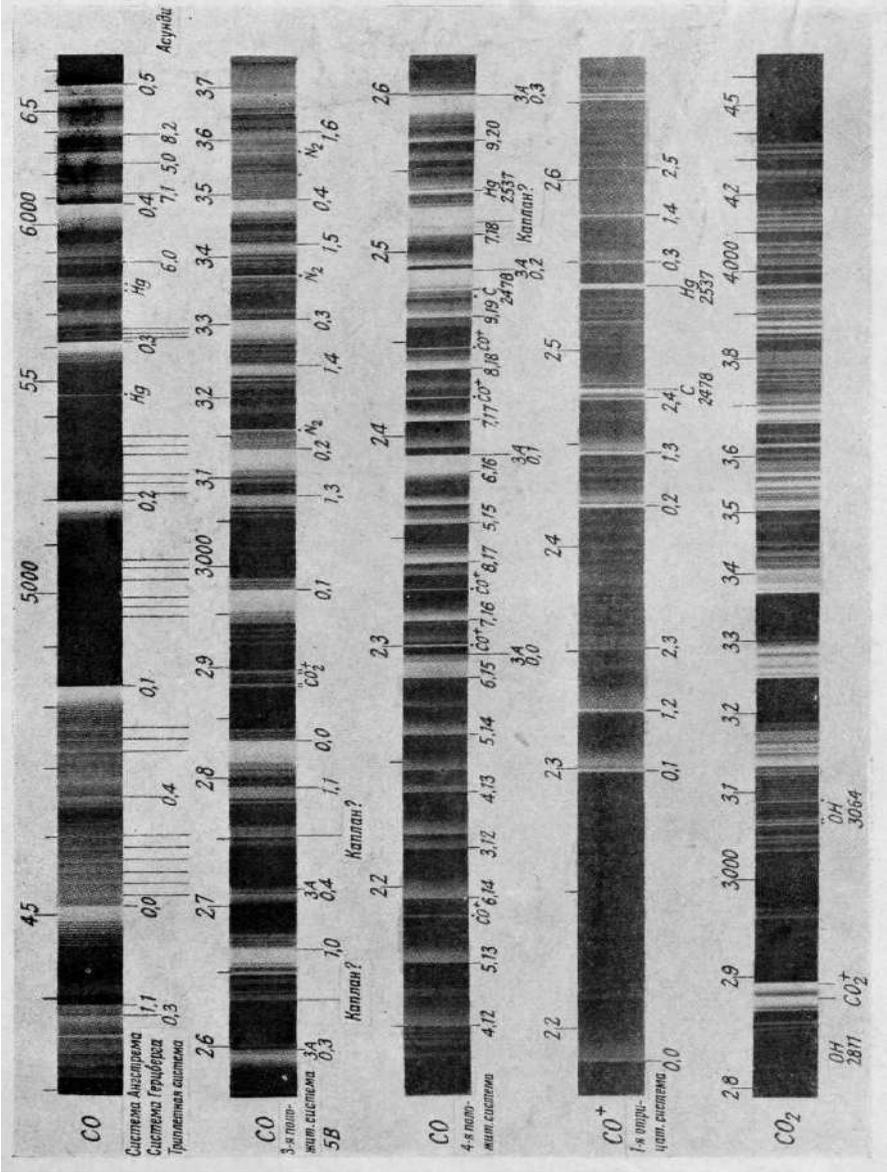
Листы 1–6 спектрограмм представляют собой увеличения позитивов, спектры же сравнения на листах 7 и 8 являются репродукциями негативов.

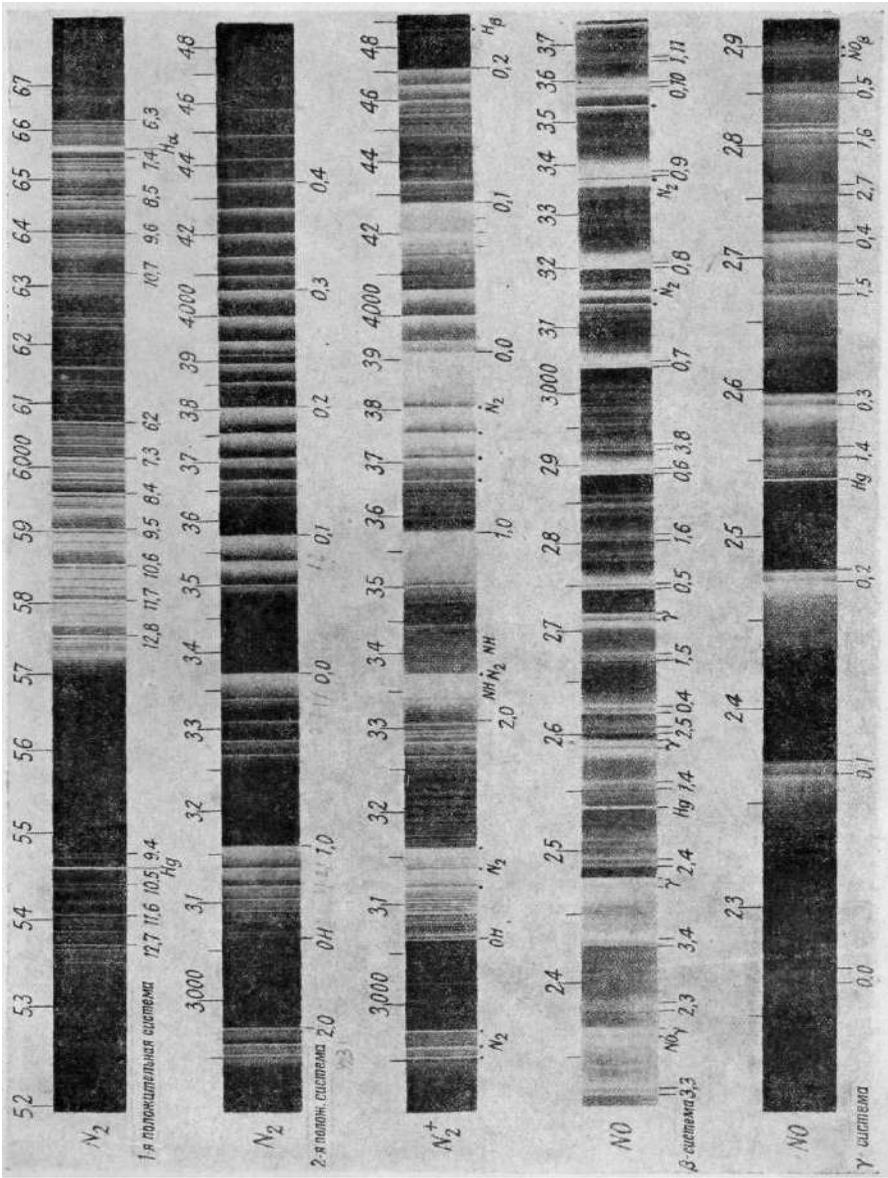
Лист 1	CaF	Фтористый кальций в дуге между угольными электродами; спектрограф со стеклянной оптикой.
	CaO	Углекислый кальций в дуге между угольными электродами; спектрограф со стеклянной оптикой.
	AlO	Высоковольтная дуга между алюминиевыми электродами; спектрограф с дифракционной решеткой.
	AlC1	Разрядная трубка; спектрограф с кварцевой оптикой.
Лист 2	SiO	Нагреваемая кварцевая разрядная трубка; спектрограф с дифракционной решеткой.
	CO	Системы Ангстрема, Герцберга и триплетная система. Положительный столб разряда через CO <sub>2</sub> ; спектрограф со стеклянной оптикой.
	CO	Третья положительная система и полосы 5B. Положительный столб разряда через CO <sub>2</sub> ; спектрограф с кварцевой оптикой, средняя дисперсия.
	CO	Четвертая положительная система. Положительный столб разряда через CO <sub>2</sub> ; спектрограф с кварцевой оптикой, средняя дисперсия.
Лист 3	CO <sup>+</sup>	Первая отрицательная система. Отрицательное свечение разряда через CO <sub>2</sub> ; спектрограф с кварцевой оптикой, средняя дисперсия.
	N <sub>2</sub>	Первая положительная система. Положительный столб разряда через N <sub>2</sub> ; спектрограф со стеклянной оптикой.

	$N_2$	Вторая положительная система. Положительный столб разряда через $N_2$ . Большой автоколлимационный спектрограф с кварцевой оптикой.
	$N_2^+$	Отрицательное свечение разряда через $N_2$ ; спектрограф с кварцевой оптикой, средняя дисперсия.
	NO $\beta$	Активный азот; спектрограф с кварцевой оптикой, средняя дисперсия.
	NO $\gamma$	Положительный столб разряда в воздухе. Спектрограф с кварцевой оптикой, средняя дисперсия.
Лист 4	$H_2$	} Разряд через $H_2$ ; спектрограф со стеклянной оптикой.
	$H_2$	
	ОН	Бунзеновское пламя; спектрограф с кварцевой оптикой, средняя дисперсия.
	СН	Разряд (? ацетилен).
	НН	Разряд через протекающий $NH_3$ ; спектрограф с кварцевой оптикой, средняя дисперсия.
	CuH	Высоковольтная дуга в водородном пламени; спектрограф с кварцевой оптикой, средняя дисперсия
	ZnH	Zn в разряде через $H_2$ ; спектрограф с кварцевой оптикой, средняя дисперсия.
	CdH	Полый катод; спектрограф с кварцевой оптикой, средняя дисперсия.
Лист 5		Бунзеновское пламя. Внутренний конус. Пламя этилена. Внутренний конус. Спектрограф с кварцевой оптикой, средняя дисперсия. Пламя CO.
	$C_2$	Полосы Свана.
	CN	Фиолетовая система; спектрограф со стеклянной оптикой.
	CN	Красная система. $CCl_4$ в активном азоте; спектрограф со стеклянной оптикой.
	CS и $S_2$	Сера в дуге между угольными электродами; спектрограф кварцевый, малая дисперсия.

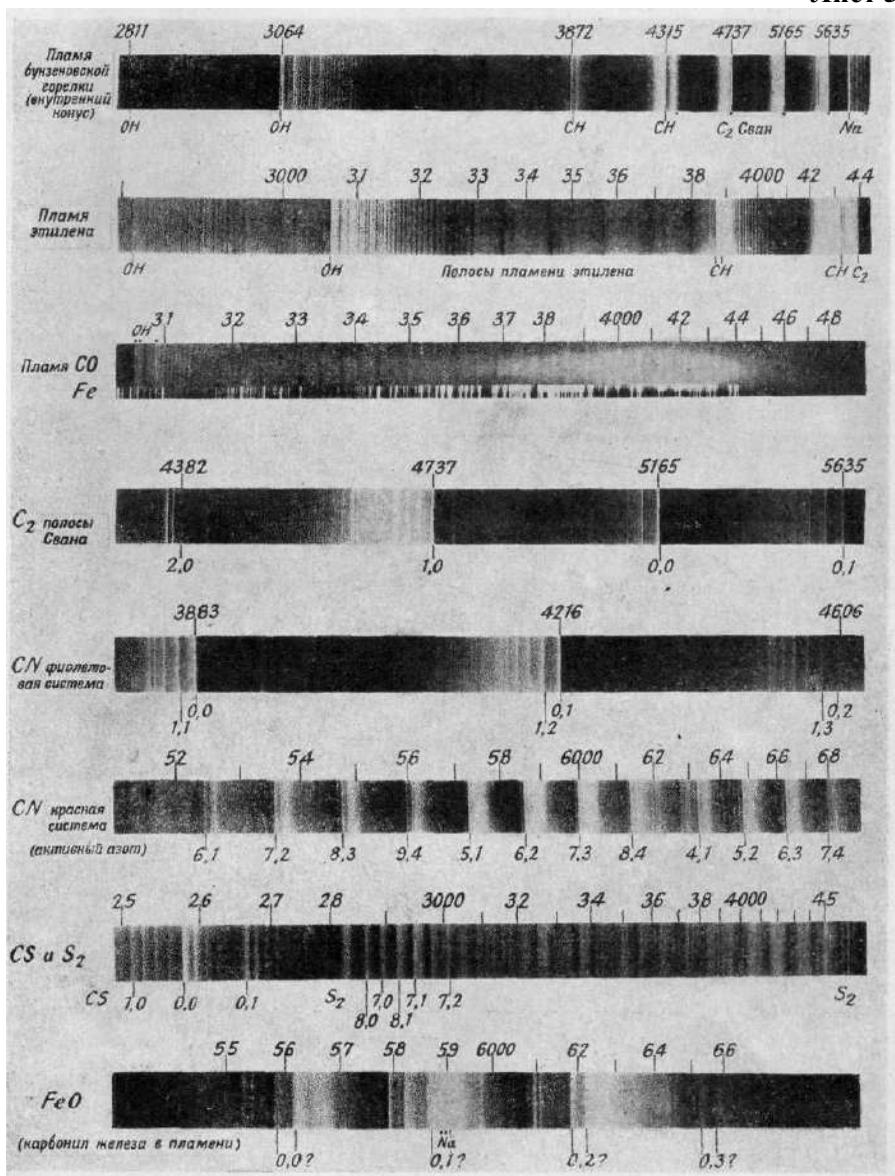
	FeO	Карбонил железа в пламени; спектрограф со стеклянной оптикой.	
Лист 6	CuCl	Хлористая медь в дуге между угольными электродами; спектрограф со стеклянной оптикой.	
	SiO	Дуга в воздухе между медными электродами; спектрограф с диффракционной решеткой.	
	BO	Борная кислота в дуге между угольными электродами, спектрограф со стеклянной оптикой.	
	SO и SO <sub>2</sub>	Разряд через протекающий SO <sub>2</sub> ; спектрограф с кварцевой оптикой, малая дисперсия.	
	SO <sub>2</sub>	Поглощение.	
	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Поглощение парами.	} Сплошной спектр водорода; спектрограф с кварцевой оптикой, средняя дисперсия.
	CH <sub>2</sub> O	Поглощение парами формальдегида.	
	J <sub>2</sub>	Поглощение парами иода; лампа накаливания; спектрограф со стеклянной оптикой.	
Лист 7		Спектры сравнения. Дуга между железными электродами; дуга между медными электродами, ртутная кварцевая лампа и неоновая разрядная трубка.	
Лист 8		Спектры сравнения. Дуга между железными электродами.	

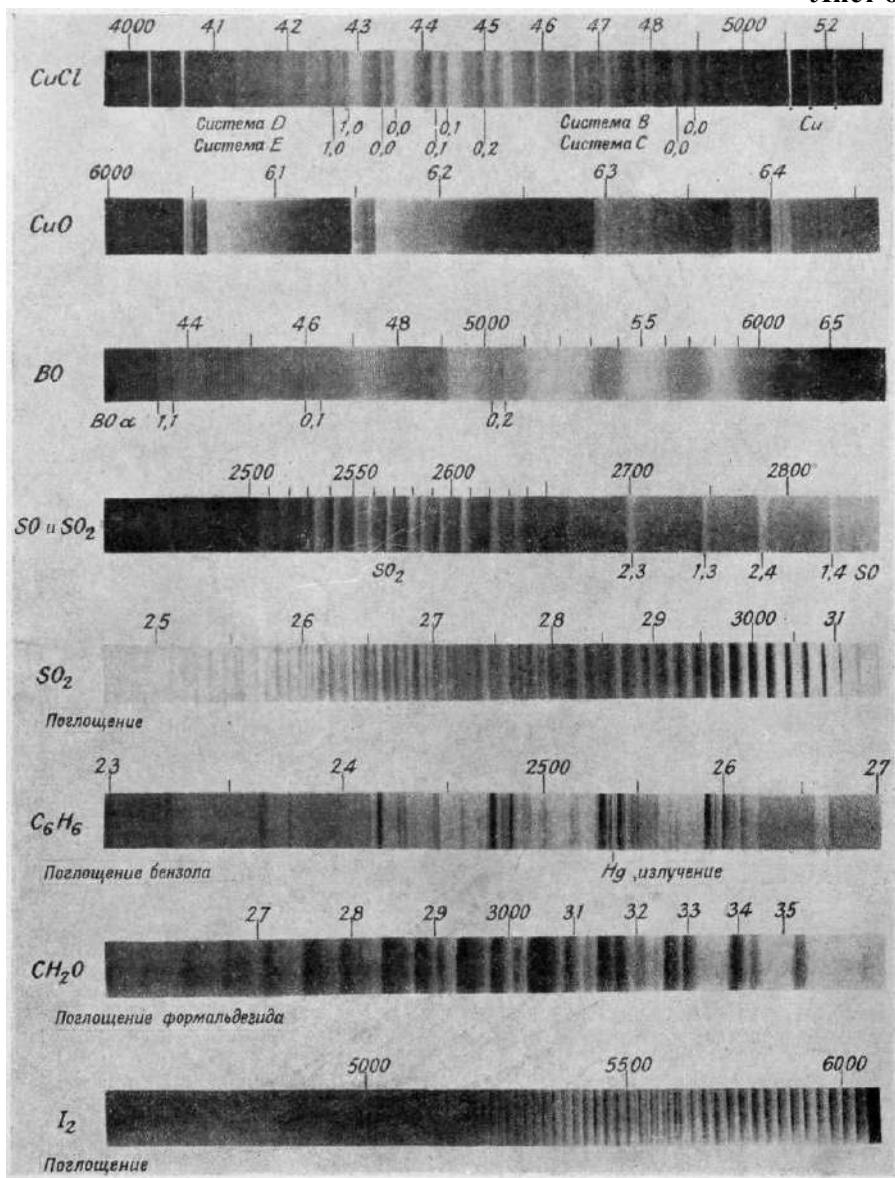


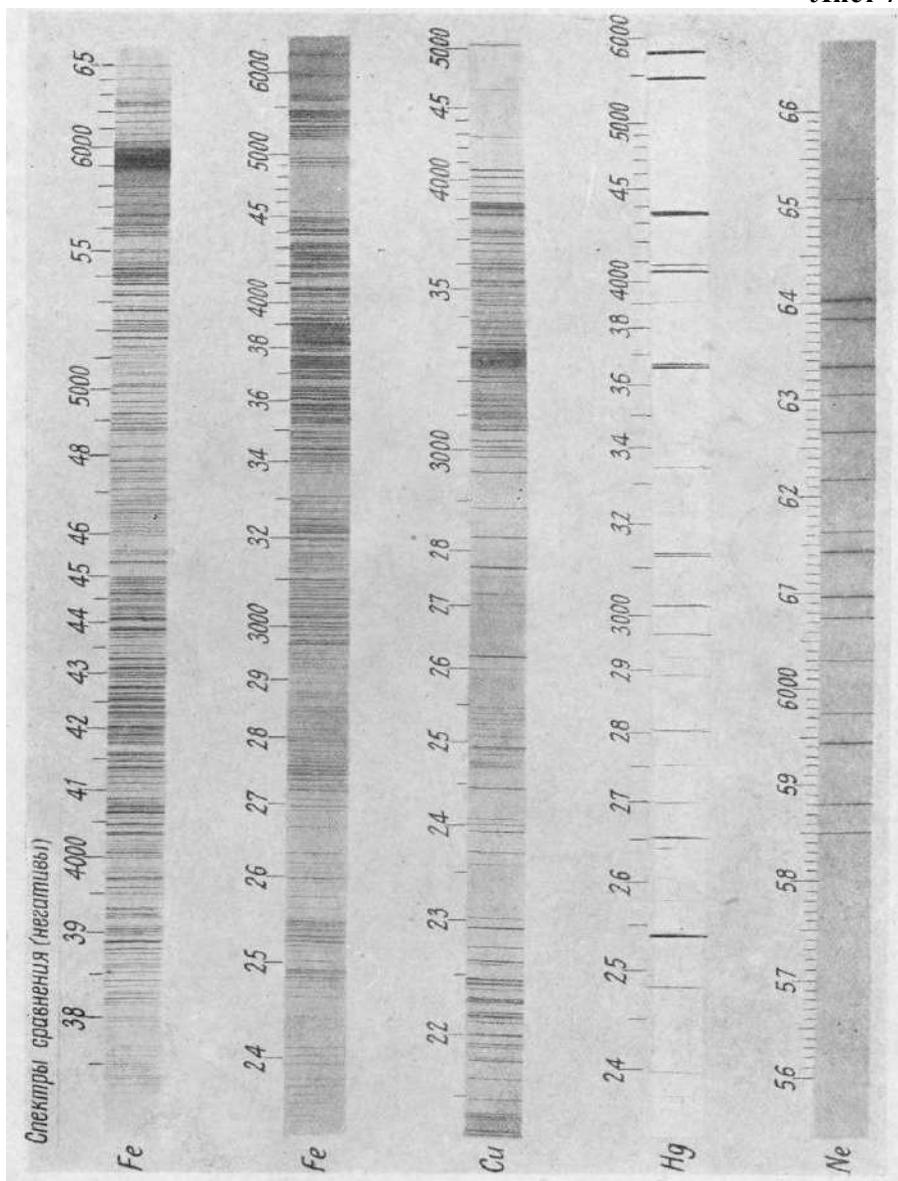


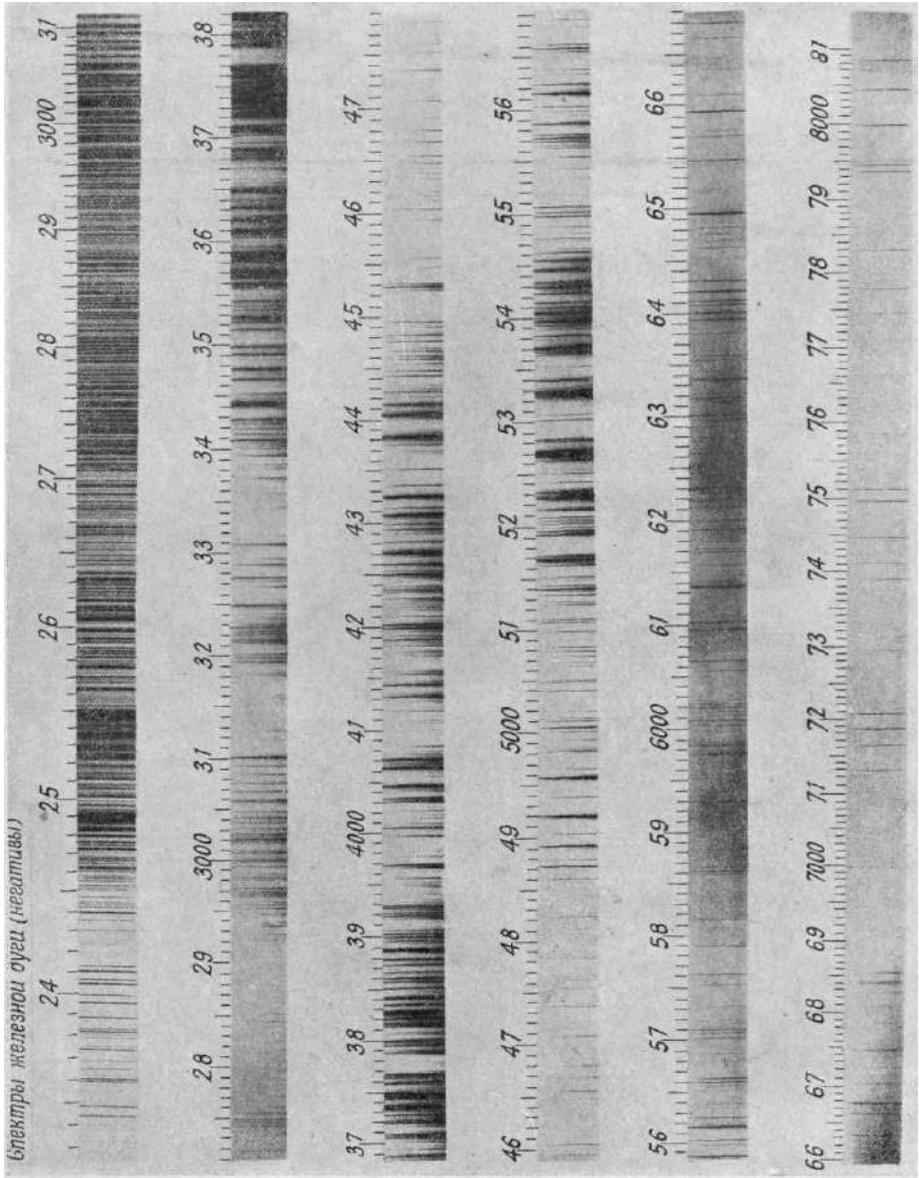




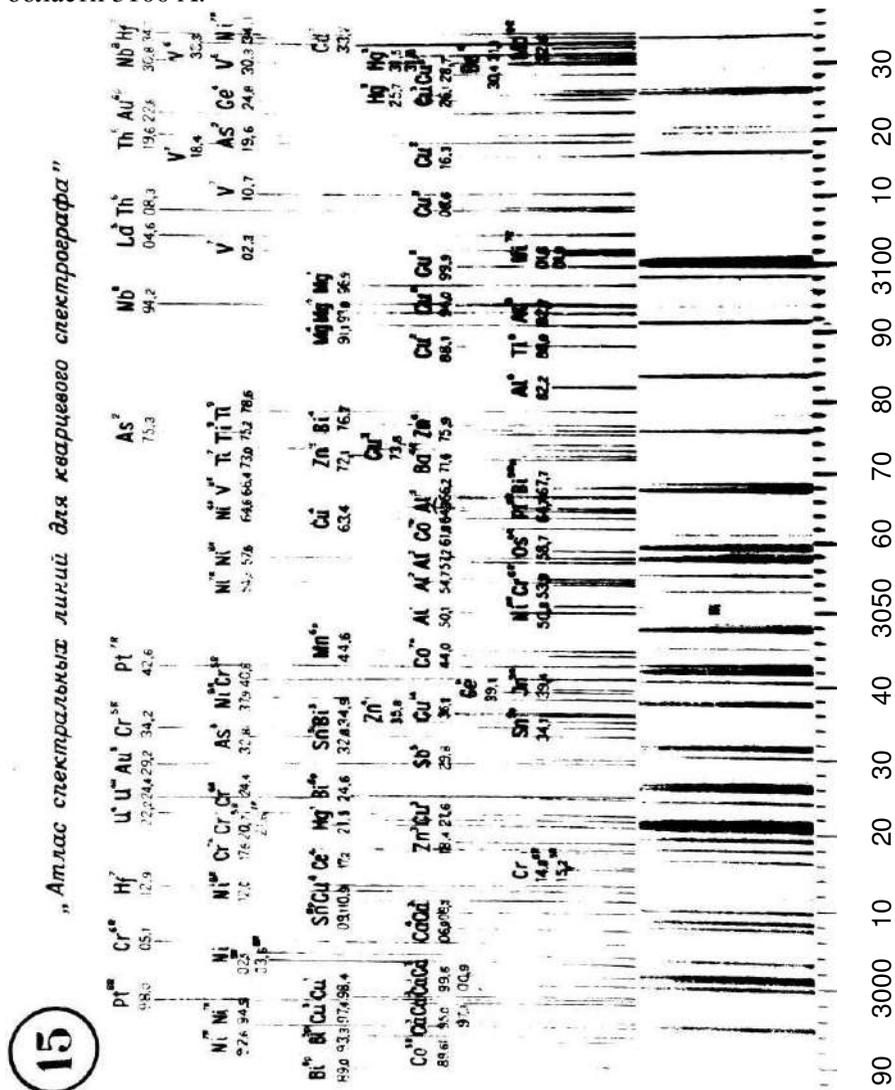






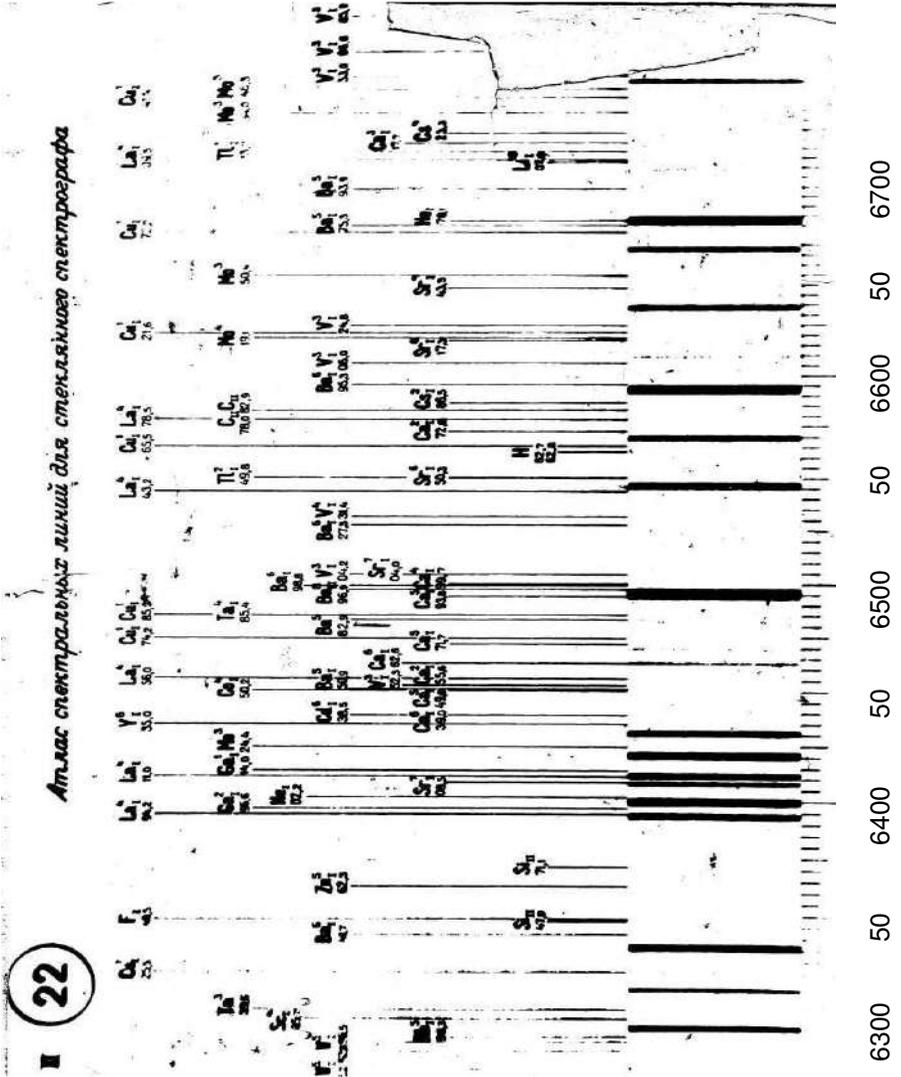


Характерные группы линий для кварцевого спектрографа в области 3100 Å.



### Приложение 3

Характерные группы линий для стеклянного спектрографа в области 6400 Å.



Приложение 4

Таблица П1

**Качественный состав излучателей пламени составов красного, желтого, зеленого и фиолетового огней**

Излучатель		Длина волны, Å	КХМ – I	КХ – I	КТ – I
1		2	3	4	5
Серия ярких полос	SrOH ?	6675	интенсивная	интенсивная	интенсивная
	SrCl	6619,9 6614	очень интенсивная	очень интенсивная	очень интенсивная
	SrCl	6483 6462	очень интенсивная	очень интенсивная	очень интенсивная
	SrCl	6362 6359	очень интенсивная	очень интенсивная	очень интенсивная
	SrCl	6239	очень интенсивная	очень интенсивная	очень интенсивная
Широкая полоса	SrCl или SrOH	6070 6050	интенсивная	размытая	размытая
	CaCl	5928 5934	интенсивная	нет	нет
Полоса	CaCl	5810	слабая	нет	нет
Полоса	SrF	5779,5	очень слабая	интенсивная	интенсивная
Линия	Ba	5535,5	интенсивная	нет	нет
Полоса	?	5515	интенсивная	нет	нет
Полоса	BaCl	5320	слабая	размытая	размытая
Полоса	BaCl	5240,5	интенсивная	размытая	размытая
Полоса	MgH	5211	узкий кант	нет	нет
Линия	Mg	5187	интенсивная	очень слабая	слабая
Линия	Mg	5172	интенсивная	очень слабая	слабая
Линия	Mg	5167	интенсивная	очень слабая	слабая
Полоса	BaCl	5139	интенсивная	слабая	очень слабая
Серия узких полос	CO	5130 5000	слабые	нет	нет

Продолжение таблицы III

1		2	3	4	5
Полосы	MgO	5007 4997 4986 4974	четкие	очень слабые	слабые
Линия	Sr	4876,3	слабая	нет	нет
	Sr	4872,5	слабая	нет	нет
	Sr	4832,0	интенсивная	нет	нет
	Sr	4811,9	интенсивная	нет	нет
	Sr	4742	слабая линия	нет	нет
	Sr	4722,3	слабая линия	нет	нет
	Sr	4607	яркая	яркая	яркая
	Cs ?	4593	заметная	нет	нет
	Mg	4571,1	заметная	нет	нет
	Mg или Cs ?	4554	заметная	нет	нет
	Fe	4383,5	очень слабая	нет	нет
	Fe	4307,9	очень слабая	нет	нет
	Cr	4289,7	очень слабая	нет	нет
	Fe	4271,8	очень слабая	нет	нет
	Cr	4254,3	очень слабая	нет	нет
Ca	4226	интенсивная	очень слабая	слабая	
Sr	4215	слабая	очень слабая	слабая	
Sr	4077,7	слабая	слабая	слабая	

Продолжение таблицы III

ЖТ – I			ЗТ – I			ФТ – I		
Вид	Излучатель	Длина волны, Å	Вид	Излучатель	Длина волны, Å	Вид	Излучатель	Длина волны, Å
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Серия полос	SrCl	6670 6619,9 6613,7 6482,9 6362,4 6239,3	серия полос	BaO	6782,8	серия ярких полос	SrF	6632
				SrCl	6613,7		SrCl	6613,7
				BaO	6493,1		?	6550
				SrCl	6362,4		SrCl	6462 6359 6239
Очень слабая полоса	SrCl или SrOH	6070	очень слабая полоса	SrCl	6239,3	размытая полоса	SrCl SrOH	6070 6050
Очень яркий дублет	N	5896 5890	яркая линия	Ba	5535	дублет	Na	5896 5890
Слабая линия	Sr	4607	полоса	BaCl	5320,8	размытая полоса	Cu SrF	5782,1 5779,5
			полоса	BaCl	5240,5	полоса	SrF	5772,0
			слабая полоса	BaCl	5213	серия очень слабых полос	?	5507
							CuCl	5380
							CuCl	5262,3
							?	5175
			полоса	BaCl	5167	линия	Cu	5105,5
			яркая полоса	BaCl	5139,2	серия полос	CuF	5061
							CuCl	4982
							CuCl	4950
							CuCl	4881,5 4847
Sr	4842							
CuCl	4788,5							
SrO	4672,6							

## Окончание таблицы III

1	2	3	4	5	6	7	8	9
			яркая полоса	BaCl	5136	линия	Sr	4607
			слабая полоса	?	5105	серия широких полос	SrO ?	4560
							SrO ?	4544
							CuCl ?	4523
			полоса	BaCl	5066	полоса	SrO	4494
			полоса	BaF	5000,6 4992,1 4950,8	серия полос	CuCl	4463
			очень слабая линия	Sr	4607	серия полос	?	4434
							?	4412
							?	4354
							CuCl	4333,2
							?	4297
							?	4293
							?	4288
							CuCl	4280,9
						полоса	CuCl	4259
						серия	CN	4197
						узких	Sr	4193
						полос	CuCl	4188
							SrO	4188
						линия	Sr	4077

В приложении 4 четко видно, что основными излучателями в составах красного огня КХМ – I, КХ – I, КТ – I являются молекулярные полосы SrCl и линии Sr. На полосы SrCl возможны наложены полосы SrO и SrOH.

Так как в качестве примесей составы содержат барий и кальций, то появляются еще полосы BaCl и CaCl.

Спектр пламени состава КХМ – I отличается от спектров пламени составов КХ – I и КТ – I наличием интенсивных полос MgO и MgH, наличием линий Mg и большого количества линий Sr.

Это указывает на то, что температура пламени состава КХМ – I выше, чем температура пламени КХ – I и КТ – I.

Эта температура достаточна, чтобы возбудились самые слабые

линии стронция, полосы окиси углерода и линии железа. Железо присутствует в составе как примесь.

Спектр пламени состава КХ – I отличается от спектра пламени состава КХМ – I почти отсутствием линии Mg и полос MgO, меньшим количеством линий стронция Sr и меньшим содержанием примеси кальция, но заметнее полоса SrF.

Полосы SrCl менее интенсивны, чем в спектре КХМ- I.

Излучение пламени состава КТ – I более интенсивное, чем КХ – I, но слабее, чем КХМ – I. Имеются слабые линии Mg и полосы MgO.

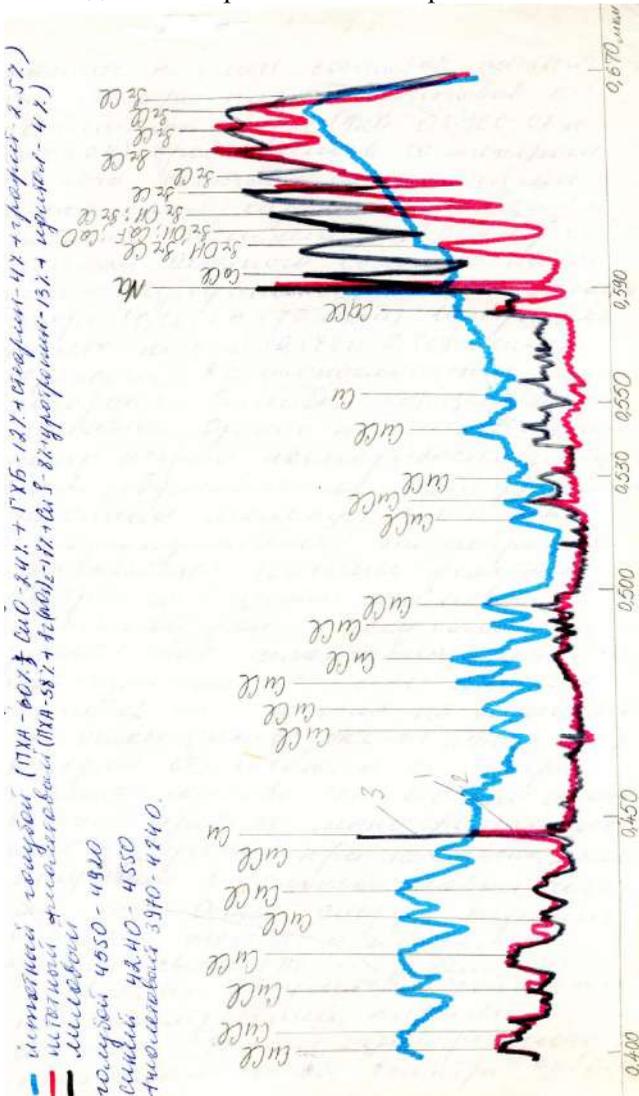
В спектре излучения пламени состава ЖТ – I основными излучателями являются желтый дублет натрия (589 нм) и полосы SrCl.

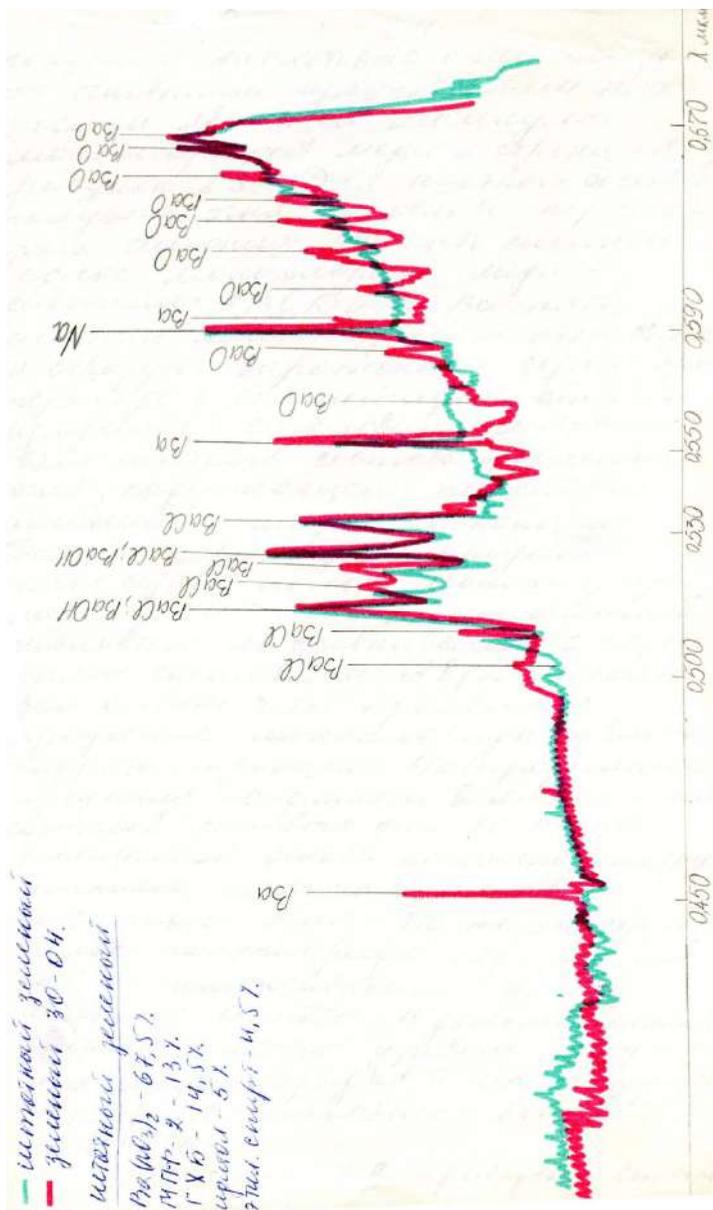
Основными излучателями в спектре пламени состава ЗТ – I являются интенсивные полосы BaCl, имеются также полосы SrCl, появление которых объясняется наличием примеси Sr в составе.

В спектре излучения ФТ – I много интенсивных полос SrCl, CuCl и появляются полосы SrO, SrF. Полосы SrF можно объяснить наличием фтора в рецепте воспламенительного состава, который нанесен на торец звездок. Возможно наличие полос Sr.

## Приложение 5

Распределение оптической плотности почернения в зависимости от длины волны для некоторых составов пиротехнических пламен.





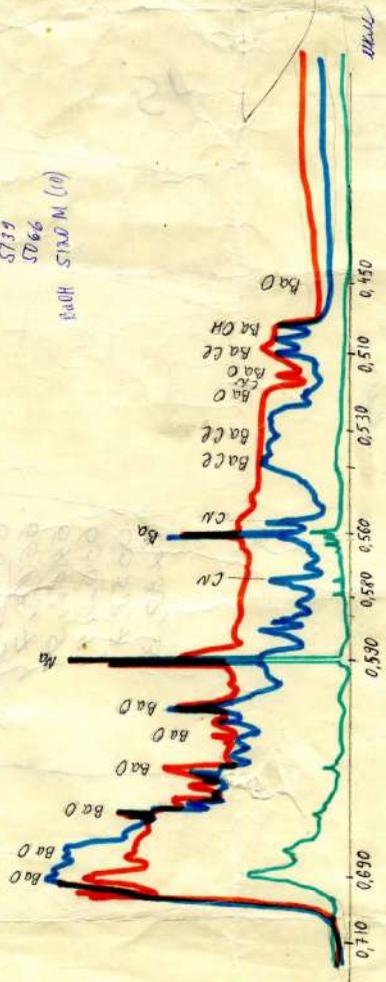


6.12.90 Fri. NI  
 measurement 30

Beu. Val. 5000-5600 A  
 Bell  
 5320,8  
 5240,5  
 5219  
 5164  
 5139  
 5066  
 Bath STAD.M. (10)

C. B.  
 0 - 9  
 46 - 3  
 49 - 1

710  
 680  
 BaO 7093,4  
 6733,8  
 6452,1  
 6291,0  
 6214,7  
 6165,1  
 6102,3



— Ba (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - 85% + NH<sub>4</sub> - 15%  
 — Ba (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - 85% + NH<sub>4</sub> - 15% + DBOA - 30%  
 — Ba (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> - 85% + NH<sub>4</sub> - 15% + 4000 ppm DBOA - 30%

## Приложение 6

(Фрагмент справочных данных из книги Р. Пирса, А. Гейдона «Отождествление молекулярных спектров» – М.: ИЛ, 1949. – 240 с.)

### Пояснения к таблице кантов устойчивых полос

ДЛИНЫ ВОЛН. В первом столбце указаны длины волн в воздухе, выраженные в международных ангстремах. Полосы особенно часто встречающихся примесей отмечены звездочкой перед длиной волны. Буквы К, Ф и М непосредственно следующие за длиной волны, означают соответственно, что измерение относится к канту полосы, отнесенных в сторону больших длин волн (красное отнение), меньших длин волн (фиолетовое отнение) или к максимуму не имеющей канта полосы. Буква О использована в нескольких случаях и обозначает, что указанная длина волны относится к началу полосы.

ИНТЕНСИВНОСТИ. Интенсивности оценены на глаз по десятибалльной шкале с оценкой 10 для наиболее интенсивной полосы системы. Напечатанные прямым шрифтом интенсивности взяты из действительных экспериментальных наблюдений. Отсутствие балла для интенсивности в том или ином столбце означает, что нет сведений о появлении системы в этом источнике, черточка же означает, что при нормальных условиях эксперимента появление полосы в этом источнике маловероятно (например, полоса, возникающая при переходе между двумя возбужденными электронными состояниями, как правило, не наблюдается в спектре поглощения при обычных температурах).

ИСТОЧНИКИ. В таблицу внесены интенсивности полос в следующих источниках под заголовками:

Поглощение	– Поглощение в парообразном состоянии
Испускание	– Испускание в пламени
Испускание (д)	– Испускание в дуге при атмосферном давлении (в воздухе).
Испускание (в)	– Испускание в дуге при пониженном давлении (в вакууме).
$p^+$ } $p^-$ }	– в разрядных трубках различного рода.

**ВИД КАНТА.** Данные о виде канта содержатся в предпоследнем столбце, причем приняты следующие сокращения:

УД – Узкий двойной кант (расстояние  $1/4 - 2\text{\AA}$ );

УТ – Узкий тройной кант (расстояние  $1/4 - 2\text{\AA}$ );

Д – Двойной кант (расстояние  $2 - 15\text{\AA}$ );

УДД – Двойной кант; каждая компонента – узкий двойной кант;

Г – Группа из четырех или пяти кантов;

Гд – Группа из пяти кантов, кажущаяся двойным кантом при малой дисперсии;

Л – Узкая полоса, похожая на атомную линию;

К – Кант серии или группы полос;

Т – Тройной кант (расстояние  $2 - 15\text{\AA}$ );

ск – Сопровождается более слабым кантом со стороны красного конца;

сф – Сопровождается более слабым кантом со стороны фиолетового конца;

**УСЛОВИЯ ПОЯВЛЕНИЯ.** В последнем столбце содержатся некоторые данные о специальных условиях или об источниках, наиболее благоприятных для появления данной полосы, причем приняты следующие сокращения:

р – Слабо конденсированный разряд;

э – Управляемый электронный источник;

ф – Флуоресценция;

б.э.р. – Безэлектронный высокочастотный разряд;

к. – Кольцевой разряд;

т. – Трансформатор Тесла;

Ar – Присутствие аргона;

H – Присутствие водорода;

He – Присутствие гелия;

N – Возбуждение активным азотом;

Ne – Присутствие неона.

## Канты устойчивых полос

	Поглощение	Испускание	Испускание (д)	Испускание (в)	p <sup>+</sup>	p <sup>-</sup>	Молекула	Система	Вид	Условия появления
6373,3 К			8				ZrO	γ		
6376,9 К			2				CuO			
6368,0 К	10						O <sub>2</sub>	жидкость		
6366,9 К					5		CO	Асунди		
6362,4 Ф	4	4	5				SrCl		К	
6361,3 Ф	6	3					CaJ		К.ск	
6322,9 Ф			-		7		N <sub>2</sub>	1-ая положительная	Т	Н

## Пояснение к таблице систем полос молекул

Эта часть содержит подробные таблицы для каждой системы полос в отдельности.

**УСЛОВИЯ ПОЯВЛЕНИЯ.** Здесь указывают источники, в спектре которых получалась данная система. Это дает представление об условиях, наиболее благоприятных для возникновения системы, но это не значит, конечно, что те же полосы с достаточной интенсивностью нельзя получать и в других источниках.

**ВИД.** Указывается направление, в котором полосы отненены. Термины «красное», «фиолетовое» отнение соответственно указывают, что интенсивность полос убывает по направлению к красному и фиолетовому концу спектра. Кроме того, указаны все помогающие отождествлению отличительные ее черты.

**ПЕРЕХОД.** Здесь указывается тип электронного перехода, так как это дает добавочную информацию относительно вида системы, особенно при пользовании большой дисперсии. Когда нижнее электронное состояние представляет собой нормальное, или основное, состояние, то и

это указано, так как такие системы легко появляются в спектрах поглощения. Следует иметь в виду, что вид полосы зависит в значительной степени от относительных констант молекулы в обоих электронных состояниях и от дисперсии, при которой полоса изучается.

$^1\Sigma \rightarrow ^1\Sigma$ . Одиночные Р- и R-ветви. Одинарный кант.

$^1\Sigma \rightarrow ^1\Pi$ ,  $^1\Pi \rightarrow ^1\Sigma$ . Одиночные Р-, Q- и R-ветви. Двойной кант.

$^2\Sigma \rightarrow ^2\Sigma$ . Двойные Р- и R- ветви, очень слабые ветви-спутники.

Как правило, узкий двойной кант.

$^2\Pi \rightarrow ^2\Pi$ ,  $^2\Delta \rightarrow ^2\Delta$ . Две Р- и две R- ветви и короткие слабые

Q – ветви и ветви-спутники.

### ЗЕЛЕНАЯ СИСТЕМА.

Имеется одна интенсивная система полос ВаСl в зеленой области, а также две слабые системы в ближней ультрафиолетовой области.

**Условия появления.** Хлористый барий в дуге между угольными электродами или в пламени и в спектре поглощения.

**Вид.** Система оттенена лишь слабо, канты довольно неотчётливы, вращательная и колебательная структуры для некоторых серий оттенены в противоположных направлениях.

**Переход.**  $^2\Pi \rightarrow ^2\Sigma$ , основное состояние. Ниже приведены длины волн (табл. ПЗ). Буквы К и Ф указывают красное и фиолетовое оттенение серий.

Таблица ПЗ

### Длины волн

Длина волны, $\lambda$ , Å		Интенсивность, J	Серия
5320,8	Ф	3	0, 1 i
5240, 5	К	10	0, 0 i
5213,0	Ф	1	0, 1 ii
5167,0	К	2	1, 0 i
5139,2	Ф	10	0, 0 ii
5136,0	К		
5066,0	Ф	1	1, 0 ii

## УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ СИСТЕМЫ.

**Условия появления.** В дуге.

Более длинноволновая система соответствует переходу  ${}^2\Sigma \rightarrow {}^2\Sigma$ , основное состояние; в ней отчетливо выражены серии с фиолетовым оттенением. Ниже приведены три наиболее интенсивные серии (табл. П4).

*Таблица П4*

### **Длины волн**

Длина волны, $\lambda$ , Å	Серия
3923,0	0, 0
3876,8	1, 0
3832,0	2, 0

Коротковолновая система соответствует переходу  ${}^2\Sigma \rightarrow {}^2\Sigma$ , основное состояние; фиолетовое оттенение. Наиболее интенсивные серии (табл. П5).

*Таблица П5*

### **Длины волн**

Длина волны, $\lambda$ , Å	Серия
3691,7	0, 0
3649,9	1, 0

## **Практические замечания**

Краткие замечания, могущие оказаться полезными при практической работе по отождествлению молекулярных спектров.

При использовании таблиц можно рекомендовать следующую последовательность действий:

1. В спектре, подлежащем отождествлению, выбирают две или три наиболее интенсивные полосы и их длины волн сопоставляют с

таблицами длин волн устойчивых кантов. Если в таблицах оказываются длины волн, близкие к этим длинам волн, и если, кроме того, полосы отненены в том же направлении, следует обратиться к подробным таблицам для данной системы.

2. Если все полосы, приведенные в этих таблицах, оказываются присутствующими в спектре и совпадающими по виду и условиям появления, то правильность отождествления можно считать установленной. При этом нельзя удовлетворяться приблизительным совпадением только нескольких полос, если выбор их не может быть специально обоснован. Так, например, в спектре поглощения могут часто присутствовать только полосы с  $v = 0$ , а другие полосы могут отсутствовать; в спектре флуоресценции могут присутствовать только полосы, соответствующие определенному значению  $v$  и т.д. Если в спектре остаются неотожествленные полосы, принадлежащие к тому типу, они могут быть продолжением системы или могут относиться к другой системе той же молекулы. Если исчерпаны эти возможности и все еще остаются неотожествленные полосы, то следует выбрать самую интенсивную из них и снова обратиться к таблицам устойчивых полос.

3. После того, как по этому методу отождествлено максимально возможное число систем, следует просмотреть подробные таблицы для систем других молекул, могущих быть образованными из элементов, присутствие которых теперь установлено. Этим путем часто удается обнаружить и отождествить слабые полосы, ускользнувшие от внимания в сложном спектре.

4. Затем определяется принадлежность интенсивных атомных линий, если такие линии присутствуют. Это может подтвердить произведенное отождествление или указать на наличие неподозревавшего загрязнения.

5. В заключение рассматривается вероятность возникновения полученных систем в спектре данного источника. Например, на основании входящих в состав компонентов. Это часто помогает исключить ошибочные отождествления, объясняющиеся случайными совпадениями.

Таблица кантов устойчивых полос

	Поглощение	Испускание	Испускание (д)	Испускание (в)	P <sup>+</sup>	P <sup>-</sup>	Молекула	Система	Вид	Условия появления
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
10603,3 К				10	10		BaH			
10420 Ф					10		N <sub>2</sub>	1-я положительная	Т.К.	
10052 К				10	10		BaH			
*9834,7 Ф			10				CaO		К.	
9420 O	9						H <sub>2</sub> O			
*9229 Ф			8				CaO		К.	
9060 O	6						H <sub>2</sub> O			
9017 К				10	10		BaH			
8924 К				10	10		BaH			
*8911,6 Ф	—	—			10		N <sub>2</sub>	1-я положительная	Т.К.	
*8722,3 Ф	—	—			8		N <sub>2</sub>	1-я положительная	Т.	
*8651,9			8				CaO			
8571,5 К		7	7				BaF		К.	
8563 O	5						HCN			
*8541,8 Ф	—	—			6		N <sub>2</sub>	1-я положительная	Т.	
*8406,0 К			1				LaO		К.	
8297 К		8	8				FeO			
8228 К		8	8				FeO			
8227 O	8						H <sub>2</sub> O			
*8153,0			10				CaO			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8137 К		8	8				FeO			
8137,0 К		7	7				BaF		К.	
8106 К		10	10				FeO			
7952 К			10				BeO			
7919 М	9						NH <sub>3</sub>			
7912 О	8						HCN			
*7910,5 К			8				LaO			
7879,3 К			10				CeO			
*7877,2 К			6				LaO		К.	
7852,5 Ф	—	—			3		C <sub>2</sub>	Выс. давление	Д.	р.
7833,9 К	—	—			3		CO	Асунди	Т.	
7831,8 К			10				CeO		К.	
7828,0 К			8				TiO	γ		
*7753,2 Ф	—	—			6		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.К.	
*7715,7			4				CaO			
7672,1 К			8				TiO	γ		
7628,1 К			7				TiO	γ		
*7626,2 Ф	—	—			7		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	
7593,7 К	10	—	—				O <sub>2</sub>	Атмосф.		
7589,6 К			7				TiO	γ	К.	
7508 Ф				10	10		SrH			
*7503,9 Ф	—	—			7		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	
*7403,5 К			10				LaO			
*7386,6 Ф	—	—			5		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*7379,8 К			8				LaO		К.	
7348,0 Ф				10	10		SrH			
7346,7 Ф				10	10		SrH			
*7318,5			2				CaO			
7297,2 К			10				CeO		К.	
7275,5 К			10				CeO			
7235,8 К			10				CeO		К.	
7227 O	5						H <sub>2</sub> O			
7210,4 К	—	—			5		CO	Асунди	Т.	
7197,7 К			7				TiO	γ		
7125,6 К			10				TiO	γ		
7116,0 К	10	8	8				BaF		Д.К.	
7087,9 К			9				TiO	γ		
7083,2 Ф	—	—					C <sub>2</sub>	Выс. давление	Д.	р.
7054,5 К			7				TiO	γ	К.	
7018,1 Ф				10	10		SrH			
7011,0 Ф	10						SrJ		К.	
* 6994,5 К			1				LaO		К.	
6984,7 Ф				10	10		SrH			
6942,6 Ф				10	10		CaH			
6930,2 Ф	10						SrJ		К.	
* 6927,6 К		2	—		2		CN	Красная циана	Т. сф.	N
6867,2 К	8	—	—				O <sub>2</sub>	Атмосф.		
*6856,3 Ф	—	—				8	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрица- тельная		

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6850,2 Ф				10	10		BaH			
6847,7 Ф	10						SrJ		К.	
*6804,0 К	—	—			8		CO	Асунди	Т.	
*6792,5 К		1	2		2		CN	Красная циана	Т. сф.	N
6788,6 Ф	—	—			6		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	
6782,8 К		8	8				BaO			
6767,8 Ф	10						SrJ		К.	
*6704,8 Ф	—	—			8		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	
6689,5 Ф				10	10		BaH			
6685,7 К	—	—			7		CO	Асунди	Т.	
6666,7 Ф	10	10					SrBr		К.	
665,6 Ф	7	7	7				SrF		К.	
6651,5 К			4				TiO	γ	К.	
6632,7 Ф	10	10	10				SrF		К.	
*6631,6 К		4	9		9		CN	Красная циана	Т. сф.	N
*6623,6Ф	—	—			9		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	
*6620,3 Ф	—	—			7		CO	Ангстрема		
6619,9 Ф	4	1	5				SrCl		К.	
6613,7Ф	10	10	10				SrCl		К.	
*6544,8 Ф	—	—			10		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	
6543,0 К			5				ZrO	γ		
6533,5			9				SmO			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6518,6 К					10		F <sub>2</sub>			
6513,5 К	—	—			9		CO	Асунди	Т.	
6513,0 Ф	5	10					SrBr		К.	
6512,0 Ф	10	10	10				SrF		К.	
6510,9			10				SmO			
6508,1 К			9				ZrO	γ		
6493,4 К			1				CuO			N
6493,1 К		9	9				BaO			
6492 Ф					5		SiF	ξ		
*6478,7 К		9	10		10		CN	Красная циана	Т. сф.	N
6473,7 К			10				ZrO	γ		
*6468,5 Ф	—	—			10		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	
6464,6 К	—	—			10		CO	Триплет		He, H
6451,5 К		7	7				CrO			
6446,2 К			5				ScO			
6442,3 Ф	—				6		C <sub>2</sub>	Выс. давление	Д.	р.
6435 Ф					10		FeBr			б.э.р.
6433,1 К	—	—			10		CO	Триплет		He, H
6430,0 К			3				CuO			N
6419,0 Ф		8	8				SrF		К.	
*6418,7 Ф	—	—	—		9		O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрица- тельная		
6416 Ф					5		SiF	ξ		
6412,9 Ф	10	7					CaJ		К.ск.	
6412,3 К			6				ZrO	γ		

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6400,4 К		1	5				CuO			N
6400 К					10		FeBr			б.э.р.
6399,0 К	—	—			10		CO	Триплет	УД.	He, H
6398,7 К	—	—	—	—	10		He <sub>2</sub>			р.
6397 Ф					5		SiF	ξ		
*6394,7Ф	—	—			9		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	
6394,3 К		9	9				CrO			
6389,3Ф				10	10		CaH		Д.	
6388,8 Ф	10	10					CaJ		К.ск.	
6378,3 К			8				ZrO	γ		
6376,9 К			2				CuO			
6368 К	10	—	—	—	—	—	O <sub>2</sub>	Жидкость		
6366,9 К	—	—			5		CO	Асунди		
6362,4 Ф	4	4	5				SrCl		К.	
6361,3 Ф	6	3					CaJ		К.ск.	
6358,7 Ф	10	10	10				SrCl		К.	
6349,5			8				SmO			
6344,9 К			9				ZrO	γ		
6342,2 К		8	8				NiO			
*6332,2 К		10	9		9		CN	Красная циана	Т.сф.	
*6322,9 Ф	—	—			7		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	N
6311,7 Ф			4				MgO			
6306,1 Ф		8	8				SrF		К.	

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6294,0 К		2	5				CuO			N
6292,8 К			7				ZrO	γ		
6291,0 К		8	8				BaO			
6286,0 Ф	0	4					CaBr		К.	
*6285,3 Ф		3	3				CaF		К.	
6278 Ф			4				CaO?			
6277,7 Ф	10	10					CaBr		К.	
6276,6 К	3	—	—				O <sub>2</sub>	Атмосф.		
6265,9 Ф					8		NBr			N
6260,9 К			8				ZrO	γ		
6258,8 Ф	0	5					CaBr		К.	
6258,5 Ф			9				CaO?			
*6256,6 Ф		4	4				CaF		К.	
6252,9 Ф	10	10					CaBr		К.	
*6252,8 Ф	—	—			3		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	N
6250,7 К	1		8				PbO	А		
6246,0 К		10					NiH			
6244,0 К	—	—		5			CO	Асунди	Т.	
6238,7 К	—	—	—			7	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы	сф.	
6231,1 Ф				8			NBr			N
6229,4 К			9				ZrO	γ		
*6224,9 Ф	5	5	5				CaCl		К.	
6218,9 К		10	10				FeO			
6218,3 К		8	8				BiO			
6211,6 Ф	10	10	10				CaCl		К.	
6193,4 Ф	5	5	5				CaCl		К.	

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*6191,7 К		6	2		4		CN	Красная циана	Т.сф.	N
*6191,2 Ф		4	3		3		C <sub>2</sub>	Свана	К.	р.
6189,4 К	—	—	—			7	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы	сф.	
6187 М					8		FeBr			б.э.р.
*6184,9 Ф	10	10	10				CaCl		К.	
6180,5 К		9	9				FeO			
6161,5 К		9	9				FeO			N
*6157,4 К			1				LaO		УД.К.	
6154,9 К		7	7				MnO		К.	
6146,8 К		4	8				CuO			N
6133,3 К		8	8				NiO			
6132,1 К			10				YO		К.	
*6122,1 Ф		3	4		4		C <sub>2</sub>	Свана		р.
6117,5 Ф				5			BiH			
6115,2 Ф						6	As <sub>2</sub> <sup>+</sup>			
6109,9 М		9	9				FeO		Л.	
6105,2 К	—	—			5		CO	Асунди	Т.	
6102,6 К					10		F			
6097 Ф			10				CaO?			
6097,3 М		9	9				FeO		Л.	
6096,8 К			8				YO		К.	
*6086,9 Ф		5	5				CaF		К.	
6086,4 К			8				VO			
*6079,9 Ф	—	—	—		8		CO	Ангстрема		
6079,3 К			8				ScO			
6072,6 К			8							

Продолжение таблицы Пб

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*6069,7 Ф	—	—			7		N <sub>2</sub>	1-я положительная	Т.	
*6064,4 Ф	8	10	10				CaF		К.	
6064,3 К			7				ScO			
6064,0 Ф					10		FeCl			б.э.р.
6060,3 Ф			6				MgO			
*6059,7 Ф		3	3		3		C <sub>2</sub>	Свана		р.
6059,3 К		10	10				CuO			N
6051,6 К		10	10				CrO			
*6050,8 Ф	5	4	6				CaF		К.	
6045,1 К		4	9				CuO			N
6039,6 К		9	9				BaO			
6039,1 К	0	4	7		7		S <sub>2</sub>			
6037,0 К	—	—	—		8		CO	Триплет		He,Н
*6036,9 Ф	8	7	6				CaF		К.	
6036,2 К			10				ScO			
6035,2 К		10	10				BiO			
*6026,4 Ф	—	—	—			10	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрицательная		
6019,5 Ф					9		NBr			N
6017,1 К			6				ScO		К.	
*6013,6Ф	—	—			7		N <sub>2</sub>	1-я положительная	Т.	
6010,5 К	—	—	—		8		CO	Триплет		He,Н
*6006 Ф			8				CaO?			
*6004,9 Ф		2	3		3		C <sub>2</sub>	Свана		р.
*6003 К			8				CaO?			
5998,9 О	—	—				10	NO <sup>+</sup>			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5993,8 Ф					8		BF			б.э.р.
*5992,6 К		2	5		6		CN	Красная циана	Т.сф.	N
5992,6 Ф						9	As <sub>2</sub> <sup>+</sup>			
5990,7 Ф					10		NBr			N
*5983 К			8				CaO?			
5980,7 К	—	—	—		8		CO	Триплет		He, H
5972,2 К			10				YO		К.	
5962,4 Ф					10		NBr			N
5962,2 К	0	5	6		6		S <sub>2</sub>			
*5959,0 Ф	—	—			8		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	
*5958,7 Ф		1	2		2		C <sub>2</sub>	Свана		р.
5939,1 К			8				YO		К.	
*5934,0 К	10	10	10				CaCl		К.	
5933,8 Ф					10		NBr			N
5931,9 К		8	8				BiO			
5910,7 К	3		10				PbO	А		
*5906,0 Ф	—	—			8		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	
5905,0 Ф					10		NBr			N
5900,7 К	0	7	9		9		S <sub>2</sub>			
5899,3 Ф	—	—			8		C <sub>2</sub>	Выс. давление	Д.	р.
5887,4 К			3				ScO			
5868,1 К		9	9				FeO			
*5866,3 К			4				LaO		УД.К.	
5864,5 К		10	10				BaO			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5861,7 К		10	10				BiO			
5861,0 К	—	—	—		6		CO	Асунди	Т.	
5859,6 К		9	9				MnO		К.	
*5858,2К		2	8		9		CN	Красная циана	Т.сф.	N
*5854,4 Ф	—	—			8		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	N
5849,1 К			3				ScO			
5847,7 К			3				ScO			
5847,6 К			3				CuO			
5842,0 К			4				YO		К.	
5840,6 К	0	7	9		9		S <sub>2</sub>			
5837,5 Ф					8		CoCl			б.э.р.
5832,7 К			2				CuO			
*5830 К	0	4	5				CaF			
5826 К	9	—	—	—	—	—	O <sub>2</sub>	Жидкость		
5822,1 Ф						10	BF			б.э.р.
5815,1 Ф					8		BF			б.э.р.
*5809,9 К	3	4	4				CaCl			
5809,8 К			3				ScO			
*5804,3 Ф	—	—			7		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	N
5801,4 М					8		FeCl			б.э.р.
5794,4 К		8	8				CrO			
5789,8 К		9	9				FeO			
5779,5 К	7	8	8				SrF			
5778,5 К			5				ZrO	β		
5775,5 Ф							MgO			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5772,0 К							SrF		К.	
5763,4 К							PrO		К.	
5758,6 К			4				TiO	α	УТ.К	
*5755,2 Ф	—	—			7		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	Н
5749,1 К	—	—	—		6		CO	Асунди	Т.	
5748,1 К			8				ZrO	β		
5737,9 М					10		CoCl			б.э.р.
5736,7 К			10				VO			
5733,0 Ф	—	—	—	—	9		He <sub>2</sub>			р.
5731,4 К					9		F <sub>2</sub>			
*5730,2К		5	8		7		CN	Красная циана	Т.сф.	Н
5724,0 К			6				ZrO	β		
5718,6 Ф					8		NBr			Н
5718,1 К			10				ZrO	β		
5712,5К		8					NiH			
5710,1 К	0	7	8		8		S <sub>2</sub>			
5701,1 К		8	8				BaO			
5698,0 К			4				HfO		К.	
5697,8 К			5				YO		К.	
5695,1 Ф					8		NBr			Н
5694,3 Ф	8	8					CuF	А	К.	
5691,0 К		10	10				PrO		К.	
5677,8 К	5	10	10				PbO			
5677 Ф					10		MnH			
5670,5 К	—	—	—		6		CO	Триплет		He,Н
5668,2 М					10		CoCl			б.э.р.

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*5653,1 Ф	—	—	—			2	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
5651,6 К	0	7	10		10		S <sub>2</sub>			
5647,6 К	—	—	—		6		CO	Триплет		He, H
5644,1 К		9	9				BaO			
5637,4 К					10		CoBr			б.э.р.
*5635,5 Ф		9	8		8		C <sub>2</sub>	Свана	К.	р.
*5631,9 Ф	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрицательная		
5629,3 К			6				TiO	β	УД.	
5629,0 К			6				ZrO	β		
5621,7 К	—	—	—		6		CO	Триплет	УД.	He, H
5614,0 К		6	6				FeO			
*5610,2 Ф	—	—			10		CO	Ангстрема		
5609,5 Ф	10	10					BaJ			
*5599,9 К			10				LaO		УД.К.	
*5598,3 К		3	3		3		CN	Красная циана	Т.сф.	N
5597,8 К			7				TiO	β	УД.К.	
5596,6 К		8	8				PrO			
5586,4 К		10	10				MnO		К.	
5585,5 Ф		8	8		8		C <sub>2</sub>	Свана		р.
*5582,8 К		6	6				FeO			
5567,0 К			8				TaO			
5563 К			10				PbH			
5551,7 К			5				ZrO	β		
5547,6 К			4				BiO			
5547,5 К			7				VO	α	УД.	N

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*5540,7 Ф		5	6	6			C <sub>2</sub>	Свана		р.
5529,5 К		8	8				NiO			
5528,3 К				9			CoBr			б.э.р.
5518,8 Ф			4				MgO			
*5515,6 Ф	—	—		2			N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	
5506,5 К			10				SbO			
*5501,9 Ф		3	4		4		C <sub>2</sub>	Свана		р.
5499,9 К	—	—	—			6	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы	сф.	
*5498 К			10				CaO?			
5497,1 К			5				TiO	α	УТ.	
5492,7 К		9	10				BaO			
*5478,5 Ф	—	—			2		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	
*5473,3 К	—	2	5		5		CN	Красная циана	Т.сф.	N
*5473 К			9				CaO			
5472,8 К	0	7	9		9		S <sub>2</sub>			
5469,3 К			9				VO			
5461,4 К	—	—	—			6	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы	сф.	
5459,4 К	8	10	10				PbO	А		
5456,8 К					8		BF			
5448,3 К			7				TiO	α	УТ.К	
5443,4 К	10						TeCl <sub>2</sub>			
*5442,3 Ф	—	—			3		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	N

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5434,9 Ф	—	—			3		C <sub>2</sub>	Выс. давление		
5418,8 К	0	7	8		8		S <sub>2</sub>			
5410,5 К			3				AlO			
5407,7 К		8	8				NiO			
*5407,1 Ф	—	—			3		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	N
5394,8 К			3				AlO			
5393,9 К					7		F <sub>2</sub>			
5381,7 Ф	10	7					BaJ			
*5380,4 К			2				LaO		УД.К.	
*5372,8 Ф	—	—				3	N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	N
5364 К	4	—	—	—	—	—	O <sub>2</sub>	Жидкость		
5360,1М	10	10	10				BaBr		К.	
5359,4 К		8	9				MnO		К.	
*5354,1 К		2	2		4		CN	Красная циана	Т.сф.	N
5353,6 К	8						TeCl <sub>2</sub>			
5352,0 К			7				PrO		К.	
5351,3 К	—	—	—		5		CO	Триплет		He,Н
5349,7 К		7	8				BaO			
5330,5 К	—	—	—		5		CO	Триплет		
5307,2 К	—	—	—		5		CO	Триплет	УД.	He,Н
5301,8 К							JO?	Пламя CH <sub>3</sub> J		
*5295,7 Ф	—	—	—			8	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрица- тельная		
5293,4 К	5						Bi <sub>2</sub>			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*5291,0 К	10	10	10				CaF		УД.К.	
5277,8 К			7				SbO			
*5262,3 К	4	4	4				CuCl	А	К.	Н
5258,2 К	5						Bi <sub>2</sub>			
5249,7 К	0	8	8		8		S <sub>2</sub>			
5240,5 К	10	10	10				BaCl		К.	
5240,0 К					10		AlCl			Н
*5239,3 К		2	3		3		CN	Красная циана	Т.сф.	Н
*5228,3 Ф	—	—	—			4	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрица- тельная		He
5224,1 К	5						Bi <sub>2</sub>			
5211 Ф			10		10		MgH			
5208,2 М	10	10	10				Ba Br		К.	
5205,5 К					10		AuCl			Н
*5198,2 Ф	—	—	—		10		CO	Ангстрема		
5194,2 К	0	8	9		9		S <sub>2</sub>			
5185,0 К			7				ZrO?		К.	
5174,5 К		10	10				NiO			
*5172,6 К				5	5		SiN		Д.	Н
5166,9 К			7				TiO	α	УТ.К.	
*5165,2 Ф		10	10		10		C <sub>2</sub>	Свана	К.	р.
5162,3 К	3	9	10				PbO	β		
5155,9 К					8		AuCl			Н
*5148,8 Ф	—	—	—			5	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрица- тельная		He
*5145,4 К	—	2	2				CaF		УД.К.	

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5141,1 К	6	7			7		CuJ		К.	N
5138 М	10	10	10				BaCl		К.	
*5129,3 Ф		7	6		6		C <sub>2</sub>	Свана		р.
5125,9 К		6					JO?	Пламя CH <sub>3</sub> J		
5121,9 К					8		AuCl			N
5102,1 К			5				AlO			
*5097,7 Ф		2	1		1		C <sub>2</sub>	Свана		р.
5096,7 К			4				ScO			
5081,0 М					10		MnBr			б.э.р.
5079,3 К			4				AlO		К.	
5074,7 К			8				HfO		К.	
5072,8 К	10	10			10		CuJ	А	К.	N
5072,1 К	—	—	—			5	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы	сф.	
5070,9 К	—	—	—		8		CO	Триплет		He,Н
5061,1 Ф	9	9					CuF	В	К.	
5060,1 К					5		N <sub>2</sub>	Вегард- Каплана		э.
*5053,6 Ф	—	—			2		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	N
5052,7 К	—	—	—		8	—	CO	Триплет		He,Н
5040,1 К			6				VO	α	УД.	N
5039,7 К	—	—	—			5	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы	сф.	
5038,8М					10		MnCl			б.э.р.
5036,2 К	0	9	9		9		S <sub>2</sub>			
5031,7 К	—	—	—		8		CO	Триплет	УД.	He,Н

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*5030,8 Ф	—	—			2		N <sub>2</sub>	1-я положи- тельная	Т.	Н
5019,7 К	8	7			7		CuJ		К.	Н
5013,2 К					8		NiCl			б.э.р.
*5007,3 Ф		10	10				MgO		К.	
5000,6 К	2		5				BaF		К.	
*4996,7 Ф		8	9				MgO			
4993,5 К					8		MnBr			б.э.р.
4992,1 К	2		5				BaF		К.	
4990,8 Ф				10			BeH			
4989,5 К	0	9	8		8		S <sub>2</sub>			
4983,8 к	5	10	10				PbO	В		
*4982,2 К	4	5	5				CuCl		К.	Н
4954,6 К			6				TiO	α	УТ.К	
4950,8 К	4		10				BaF		К.	
*4946,1 К	4	5	5				CuCl	С	К.	Н
*4935,8 К		1	2		2		CN	Красная циана	Т.сф.	Н
4932,0 Ф	10	10	10				CuF	С	К.	
4910,9 К	—	—	—			6	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы	сф.	
4892,2 К		7					GdO		К.	
*4892,1 К	—	—			2		NO	β	Д.	Н
4885,5 М					8		FeCl			б.э.р.
*4881,5 К	8	8	8				CuCl	В	К.	Н
4879,5 К	—	—	—			3	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы	сф.	
4879,3 К	8	8					CuBr	А	К.	

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4866,1 К			9				AlO			
4863,2 К			10				CeO		К.	
4857,8 К			5				ScO			
4850,6 К		6	6				BaO			
*4846,9 К	8	8	8				CuCl	С	К.	Н
4842,1 К			10				AlO			
4842,1 К	0	9	10		10		S <sub>2</sub>		К.	
4838,5 К		8					JO?	Пламя CH <sub>3</sub> J		
4837,1 К					10		N <sub>2</sub>	Вегард-Каплана		э.
*4835,3 Ф	—	—	—		10		CO	Ангстрема		
*4832,6 К		1	1		2		CN	Красная циана	Т.сф.	Н
4823,5 К	—	—	—		8		CO	Триплет		He,Н
4817,4 К			10				YO		УД.К.	
4816,9 К	8	10	10				PbO	В		
4814,7 Ф	—	—			1		N <sub>2</sub>	2-я положительная	УТ.	
4810,4 К			8				TaO			
4806,7 К	—	—	—		8		CO	Триплет		He,Н
4806 К			9				WO			
4804,3 К			5				TiO	α	УТ.	
4802 К	3	—	—	—	—	—	O <sub>2</sub>	Жидкость		
4796,5 К		8	8				BiO			
4795,9 К			9				SbO			
4794,7 К	—	—	—		9		Cl <sub>2</sub> <sup>+</sup>		УД.	б.э.р.

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4794 К					5		MnH			
4791,7 К			10				CeO		К.	
4790,6 К	0	9	9		9		S <sub>2</sub>			
*4788,5 К	5	4	4				CuCl	В	К.	Н
4787,3 К	—	—	—		8		CO	Триплет		He, H
4761,2 К			5				TiO	α	УТ.К	
*4755,7 К	5	4	4				CuCl	С	К.	Н
*4752,5 Ф				3			AlH			
4751,0 К		8	8				NiO			
4750,0 К	—	—	—		9		Cl <sub>2</sub> <sup>+</sup>		УД.	б.э.р.
4744,0 К			8				VO	α	УД.	Н
*4737,1 Ф		9	9		9		C <sub>2</sub>	Свана	К.	р.
4731,8 Ф				3			AlH			
4727,4 К		10	10				BiO			
*4723,5 Ф	—	—			1		N <sub>2</sub>	2-я положительная	УТ.	
*4715,2 Ф		8	8		8		C <sub>2</sub>	Свана		р.
4711,2 К	—	—	—			5	CO <sup>+</sup>			
4709,4 К			10				WO			
*4709,2 Ф	—	—				4	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я положительная	К.	He
4708,7 К			10				BeO			
*4705,1 К				4	4		SiN			Н
4698 О				10	10		BiH		ск.	
*4697,6 Ф		6	7		7		C <sub>2</sub>	Свана		р.
4692,7 К			8				SrO			
4689,0 К				4			CuH			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4686,2 К		8					JO?	Пламя CH <sub>3</sub> J		
*4684,8 Ф		3	4		4		C <sub>2</sub>	Свана		р.
4683,4 К	—	—	—			5	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы	сф.	
4682,6 К	—	—	—		10		Cl <sub>2</sub> <sup>+</sup>		УД.	б.э.р.
4680,2 Ф	—	—			10		C <sub>2</sub>	Выс. давление	Д.	р.
4672,6 К			2				ScO		К.	
4672,3 К			9				LuO			
4672,0 К			8				AlO			
*4670,9 Ф				4	4		AlH			
4665,7 К		5	5				NiO			
*4664,3 К				5	5		SiN			N
4661,7 К			10				LuO		К.	
4661,3 Ф	—	—	—		5		CO	Герцберга		
4658,0 К	8	8	8				PbO	В		
*4651,8 Ф	—	—	—			3	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрица- тельная		He
4649,7 К					5		N <sub>2</sub>	Вегад- Каплана		э.
4649,2 К			9				YO		УД.К.	
4648,4 К				6			CuH			
4648,2 К			8				AlO		К.	
4637,9 К			10				ZrO	α	УД.К.	
4633,3 К		8					GdO			
4631,4 Ф	6				7		AlJ		К.	
4630,6 К					5		CuJ	С	К.	N
4630 К	6						NO <sub>2</sub>			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4626,1 К			4				TiO	$\alpha$	УТ.	
4625,6 К	—	—	—	—	6		He <sub>2</sub>		Д.	р.
4619,8 К			8				ZrO	$\alpha$	К.	
4619,0 К			10				SbO			
4615,6 К		10					GdO		К.	
4613,8 К		10	10				BiO			
4613,6 К	—	—	—		9		Cl <sub>2</sub> <sup>+</sup>		УД.	б.э.р.
4612,7 К			10				VO	$\alpha$	УД.	N
4609,8 К	1	8	8		8		S <sub>2</sub>			
4609 К			8				WO			
*4006,1 Ф		1					CN	Фиолетовая циана		N
4602,6 К	—	—	—		7		CO	Триплет		He, H
*4599,7 Ф	—	—	—			4	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрица- тельная		He
4596,9 К					3		CuJ	B	К.	N
4590,5 К			8				WO			
4590,2 К					10		NiBr			б.э.р.
4586,4 К	—	—	—		7		CO	Триплет		He, H
4585,7 К			7				VO	$\alpha$	УД.	N
4584,1 К			3				TiO	$\alpha$	УТ.К	
4583,0 К		10					JO?	Пламя CH <sub>3</sub> J		
4575,1 К					4		CuJ		К.	N
*4574,3 Ф	—	—			2		N <sub>2</sub>	2-я положи- тельная	УТ.	
*4574,0 К	—	—			5		NO	$\beta$	Д.	N
4569,9 К		9	9				BiO			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*4569,8 К				4	4		SiN			N
4569,2 К	—	—	—		7		CO	Триплет		He, H
4565,8 К	—	—	—			8	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы	сф.	
4565,0 Ф	10				10		AlJ		К.	
4564,8 К			8				SrO			
4557,3 К					8		CP	В	сф.	Ar
4553,7 К	9	10	10				PbO	В		
4549,9 К		8	8				BiO			
4549,1 К	—	—	—		10		Cl <sub>2</sub> <sup>+</sup>		УД.	б.э.р.
*4546,5 К				6	6		AlH			
4545,8 К	—	—	—	—	5		He <sub>2</sub>			р.
4544,1 К			8				SrO			
4539,4 К	—	—	—			8	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы	сф.	
4535,5 К					7		N <sub>2</sub>	Вегард-Каплана		э.
4534,2 К		10					BrO?	Пламя C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Br		
4524,6 К					8		CP	В	сф.	Ar
*4524,3 К			5		5		SiN			N
4524,0 Ф	7				7		AlJ		К.	
4523,2 К	—	—			1		NH			э.
*4514,8 Ф			1		1		CN	Фиолетовая циана		N
*4510,9 Ф	—	—	—		10		CO	Ангстрема		
4507,2 К		10	10				BiO			
4506,8 К					7		CoCl			б.э.р.

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4506,2 К	—	—	—		8		Cl <sub>2</sub> <sup>+</sup>		УД.	б.э.р.
*4502,2 Ф			1		1		CN	Фиолетовая циана		N
*4502,0 К	—	—			1		NH			э.
4496,6 Ф	9				8		AlJ		К.	
*4493,8 К	4	5	5		5		CuCl	Е	К.	N
4493,8 К			4				ZrO	α	УД.	
4491,3 Ф				10	10		CdH			
*4490,2 Ф	—	—			3		N <sub>s</sub>	2-я положи- тельная	УТ.	
4487,5 К	—	—	—		8		Cl <sub>2</sub> <sup>+</sup>		УД.	б.э.р.
4486,3 К					5		CP	В	сф.	Ar
4485,0 К		7					JO?	Пламя CH <sub>3</sub> J		
*4482,4 К				6	6		SiN			N
4480 М	10						NO <sub>2</sub>			
*4479,8 К	—	—			3		NO	β	Д.	N
4477,9 К	10						CoH			
4470,5 К			2				AlO		К.	
4469,5 К			5				ZrO	α	УД.К.	
4465,5 К	8				10		BiF			б.э.р.
4464,9 К					8		BF			б.э.р.
4462,6 К		4					GdO		К.	
4454,7 К					6		CP	В	сф.	Ar
4448 К	8						NO <sub>2</sub>			
*4443,1 К				8	8		SiN			N
*4433,8 К	6	7	7		7		CuCl	Д	К.	N
4433,4 К	1	9	8		8		S <sub>2</sub>			
*4418,1 К			6				LaO		К.	

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*4416,7 Ф	—	—			3		N <sub>2</sub>	2-я положи- тельная	УТ.	
*4412,4 К	6	7	7		7		CuCl	Е	К.	Н
4412 К	10	10	10				SrJ		К.	
4410,8 К					5		CuJ	Д	К.	
4410,4 К	10	8	8				PbO	В		
*4406,9 К				8	8		SiN			Н
4403,9 К			10				CaO			
4399,6 К			10				SrO			
4399,4 К		8					BrO?	Пламя C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Br		
4393,8 К			6				AgO		Д.	
4393,1 Ф	—	—	—		8		CO	Ангстрема		
4390 К	8						NO <sub>2</sub>			
4384,8 К			10				CaO			
*4382,5 Ф		2	2		2		C <sub>2</sub>	Свана	К.	р.
4380,3 Ф	—	—	—		7		CO	Герцберга		
4372,0 К	—	—		8			O <sub>2</sub>	Шумана- Рунге		
*4371,9 К			4				LaO		К.	
*4371,4 Ф		3	4		4		C <sub>2</sub>	Свана		р.
4368,8 Ф	—	—			5		C <sub>2</sub>	Выс. давление	Д.	р.
4368,2 К					10		SiF	α		
4366,7 К			9				CaO			
4366,7 К	10				10		BiF		К.	б.э.р.
*4365,2 Ф		4	5		5		C <sub>2</sub>	Свана		р.

Продолжение таблицы Пб

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4363,4 К			10				VO	$\alpha$	УД.	N
4359,9 К					4		CuJ	D	К.	N
*4355,0 Ф	—	—			3		N <sub>2</sub>	2-я положи- тельная	УТ.	
*4353,9 К	9	9	9		9		CuCl	D	К.	N
*4353,1 К				7	7		AlH			
4351,2 К			9				CaO		К.	
4350 М	6						NO <sub>2</sub>			
*4343,6 Ф	—	—			4		N <sub>2</sub>	2-я положи- тельная	УТ.К	
4341,1 К	10	10	10				CuBr	B	К.	
4339,4 К			8				VO	$\alpha$	УД.	N
*4333,2 К	10	10	10		10		CuCl	E	К.	N
4331,6 К							BH		Л.	
*4317,6 К				5	5		SiN			N
4316,0 К	—	—	—		7		Cl <sub>2</sub> <sup>+</sup>		УД.	б.э.р.
4315,0 Ф		3		3	3		CH			
4312,5 Ф		10		10	10		CH			
4310,8 К	1	9	8		8		S <sub>2</sub>			
4307 К	6	10	10				SrJ		К.	
4305,0 К				8			NiCl			б.э.р.
4304,7 К			4				AgO		Д.	
4299,1 Ф				10	10		ZnH			
4297,6 Ф				10	10		CdH			
4295,8 К	9				8		BiF		К.	б.э.р.
*4293,7 К	—	—			3		NO	$\beta$	Д.	N
4291,8 К	—	—		9			O <sub>2</sub>	Шумана- Рунге		
4289 К	5	10					CaJ		К.	

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4288,6 К	7	7	7				CuBr	В	К.	
*4288,2 К	—	—			3		NO	β	Д.	N
4288 К							FeH			
4283 М				9	9		SiO <sub>2</sub> ?			
4281,0 К			8				SrO			
*4280,9 К	7	6	6		6		CuCl	Д	К.	N
4279,6 К				10			CuH			
*4278,1 Ф	—	—	—			10	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрицательная	К.	He
*4277,0 К				5	5		SiN			N
4274,3 К	—	—	—			10	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы		
4272,0 К	—	—	—			10	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы		
4269,8 К		8					BrO?	Пламя C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Br		
*4269,7 Ф	—	—			5		N <sub>2</sub>	2-я положительная	УТ.	
4262,8 К	8	8	8				CuBr	С	К.	
4262,8 К			6				AgO		Д.	
*4259,5 К	10	10		10	10		AlH			
*4258,9 К	8	7	7		7		CuCl	Е	К.	N
4256,6 К				8	8		SiO <sub>2</sub> ?			
4254,4 К				7	7		SiO <sub>2</sub> ?			
4252,4 К	—	—	—			8	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы		
4252,1 К			10				HfO		К.	
4248,9 К	—	—	—			5	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы		
4245,9 К					6		VH			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*4241,0 К	10	10		10	10		AlH		Д.	
4240 М				10	10		SiO <sub>2</sub> ?			
*4239,1 К				9	9		SiN			N
4237,0 Ф				10	10		ZnH			
*4236,5 Ф	—	—				9	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
4235,5 Ф				10	10		SiO <sub>2</sub> ?			
4231,6 Ф	—	—	—			8	CO <sup>+</sup>	Бальде-Джонсона	ск.	He
4231,5 К	—	—	—		7		Cl <sub>2</sub> <sup>+</sup>		УД.	б.э.р.
4228,5 Ф				9	9		SiO <sub>2</sub> ?			
4227,1 Ф	4			4	4		BaH			
4221,9 К			9				CaO			
*4216,0 Ф		9	9		9		CN	Фиолетовая циана	К.	N
4215,9 К					7		NiCl			б.э.р.
4214,2 К	—	—		7			O <sub>2</sub>	Шумана-Рунге		
4212,9 Ф	—	—	—			8	CO <sup>+</sup>	Бальде-Джонсона	Д.	He
4211 К	2	10					CaJ		К.	
4205,1 К			10				CaO		К.	
*4204,1 К				10	10		SiN			N
*4200,7 К	—	—			4		NO	β	Д.	N
*4200,5 Ф	—	—			6		N <sub>2</sub>	2-я положительная	УТ.	
*4199,1 Ф	—	—	—				N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*4197,2 Ф		7	8		8		CN	Фиолетовая циана		N
4194,7 К	—	—	—		7		Cl <sub>2</sub> <sup>+</sup>		Д.	б.э.р.
4193,6 К	2	9	8		8		S <sub>2</sub>			
4192,7 Ф					10		TiCl		К.ск.	б.э.р.
*4187,9 К	6	4	5		5		CuCl	Е	К.	N
4183,6 К					10		SbF			N
*4181,0 Ф		5	7		7		CN	Фиолетовая циана		N
4177,5 К			8				AgO		Д.	
4172,7 К	—	—		9			O <sub>2</sub>	Шумана- Рунге		
*4172,1 К				6	6		SiN			N
4171,2 К					5		N <sub>2</sub>	Вегард- Каплана		э.
4167,2 К			8				SrO			
4159,5 К	—	—	—			5	CO <sub>2</sub>			э.
4157,0 К	2	8	7				S <sub>2</sub>		сф.	
4154,4 К			10				TaO?			
4143,4 К			6				BO	α	УД.	N
*4142,2 К				10	10		SiH			
4141,8 Ф	—	—			5		N <sub>2</sub>	2-я положи- тельная	УТ.	
4140,1 К	—	—	—		8		Cl <sub>2</sub> <sup>+</sup>		Д.	б.э.р.
4137,6 К	—	—	—			6	CO <sub>2</sub>			э.
4135,8 Ф	4	4	4				BaF		К.	

Продолжение таблицы Пб

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4130,6 К			9				SbO			
*4126,6 К				8	8		SiN			N
4124,8 Ф	—	—	—			7	CO	Герцберга		
4123,6 Ф	—	—	—			7	CO	Ангстрема		
4123,6 К			10				AgO			
4120,8 К	—	—	—			6	CO <sub>2</sub>			э.
4118,9К			6				HfO			
*4116,8 К				6	6		SiN	Е		N
4115,8 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
*4113,6 К	—	—				4	NO	β	Д.	N
4112,1 К					10		SnBr			
4110 Ф	10	10	10				MgJ		К.	
4108 К	9	10					SrBr		К.	
4107,9 К	—	—	—			5	CO <sub>2</sub>			э.
4102,3 Ф	—	—		9	9		C <sub>2</sub>	Деландр-д'Азамбуха	К.	р.
4101,2 К			5				HfO		К.	
4095,4 К	—	—		10			O <sub>2</sub>	Шумана-Рунге		
4095,3 К					10		NiCl			б.э.р.
4094,5 К			10				AgO			
4093 Ф	—	—				1	C <sub>2</sub>	Выс. давление	Д.	р.
*4087,4 К				8	8		SiN			N
4084,3 К			10				CaO		К.	
4082,4 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He

Продолжение таблицы Пб

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4070,7 К	—	—	—			5	CO <sub>2</sub>			э.
4070,7 К				10			SnBr			
4068,1 Ф	—	—		6	6		C <sub>2</sub>	Деландр- д'Азамбуха		р.
*4066,3 К				5	5		AlH			
*4059,4 Ф	—	—			8		N <sub>2</sub>	2-я положи- тельная	УТ.	S.
4053 К	10	10					SrBr		К.	
*4050,7 К				8	8		SiN			N
4048,9 К	—	—	—			5	CO <sub>2</sub>			э.
4045,6 К	2	9	8		8		S <sub>2</sub>		сф.	
4041,8 Ф	—	—		3	3		C <sub>2</sub>	Деландр- д'Азамбуха		р.
4041,7 К	—	—	—		7		Cl <sub>2</sub> <sup>+</sup>			б.э.р.
4035,5 К			7				VO	α	УД.	N
4033,0 К	—	—	—		7		Cl <sub>2</sub> <sup>+</sup>			б.э.р.
*4027,8 К	—	—			6		NO	β	Д.	N
4025,3 К		3		3	3		CH			
4020,6 К	—	—		9			O <sub>2</sub>	Шумана- Рунге		
4019,7 К	—	—	—			9	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы		
4017,7 К	—	—	—			9	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы		
4017 Ф					10		HgH			
*4016,8 К				6	6		SiN			N
4015,0 К			5				VO	α	УД.	N
4014,8 К					8		CP	А		Ar
4006,2 К			8				TaO			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4005,4 К				5			CuH			
3999,6 К	—	—	—			9	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы		
*3998,4 Ф	—	—				9	N <sub>2</sub>	2-я положительная	УТ.	
3997,3 К	—	—	—			9	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы		
3994,7 К					4		SiN			N
3989,1 К	—	—	—	—	5		He <sub>2</sub>		Д.	р.
*3985,8 К				5	5		SiN			N
*3984,6 К			1		1		CN	Фиолетовая циана («хвост»)		N
3973,5 Ф	—	—	—			9	CO <sup>+</sup>	Бальде-Джонсона	ск.	He
3972,8 К				10			AuH			
3970,1 К			6				HfO		К.	
*3968,5М	10	—	—	—	—	—	Ca <sup>+</sup>	Рассеянный солнечный свет		
3961,6 К	10		6				SrCl		К.	
3960,9 К	—	—	—			7	CO <sub>2</sub>			э.
3957,0 Ф	—	—	—			7	CO <sup>+</sup>	Бальде-Джонсона	Д.	He
3955,0 К	9						PbO	С		
3951 К	6	10					CaBr		К.	
*3949,8 К				4	4		SiN			N
*3944,7 К			2		2		CN	Фиолетовая циана («хвост»)		N
*3943,0 Ф	—	—				8	N <sub>2</sub>	2-я положительная	УТ.	

Продолжение таблицы Пб

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3940,3 К					5		N <sub>2</sub>	Вегад-Каплана		э.
3938,9 К	3	9	8		8		S <sub>2</sub>		сф.	
3937,1 К	10		6				SrCl		К.	
*3933,7 М	10	—	—	—	—	—	Ca <sup>+</sup>	Рассеянный солнечный свет		
3917 К	6	10					CaBr		К.	
*3914,4 Ф	—	—	—			10	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрицательная	К.	He
3912,3 К	—	—		9			O <sub>2</sub>	Шумана-Рунге		
*3911,8 К				4	4		SiN			N
*3909,5 К			3		3		CN	Фиолетовая циана («хвост»)		N
3896,4 К			8				TaO			
3896 М	10						TlI			
3893 К					5		OH <sup>+</sup>			б.э.р.
3893,1 Ф	—	—	—		7		CO	Герцберга		
3889,3 К			10				GaO		К.	
3889,2 К					5		N <sub>2</sub>	Вегад-Каплана		э.
3889,0 К		4		4	4		CH			
*3884,3 Ф	—	—	—			3				
*3883,4 Ф		10	10		10		CN	Фиолетовая циана	К.	N
3881 М	10	10	10				MgBr		К.	
3878,6 Ф		3	3				BaF		К.	
3877,8 К	10						PbO	С		

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*3871,4 Ф		8	9		9		CN	Фиолетовая циана		N
3870,5 К	—	—	—			7	CO <sub>2</sub>			э.
*3868,3 К	—	—			6		NO	β	Д.	N
3864 Ф	10	10					MgBr		К.	
*3861,9 Ф		6	8		8		CN	Фиолетовая циана		N
3860,5 Ф				5			MgCl		К.	
3859,5 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрица- тельная		He
*3857,9 Ф	—	—	—			4	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрица- тельная		He
*3854,7 Ф		4	6		6		CN	Фиолетовая циана		N
3853,2 К	—	—	—			4	CO <sub>2</sub>			э.
3852,2 Ф	—	—		10	10		C <sub>2</sub>	Деландр- д'Азамбуха	К.	р.
3847,0 К			9				BO	α	УД.	N
3844 М							HNO <sub>2</sub> ?			
3842,2 Ф				8			MgCl		УД.К.	
3840,6 К	—	—		10			O <sub>2</sub>	Шумана- Рунге		
3838,8 К	—	—	—			6	CO <sub>2</sub>			э.
3837,1 К	4	9	8		8		S <sub>2</sub>		сф.	
3836 М	10						TlI			
3832,9 К			6	6			SiO <sub>2</sub> ?			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3830,5 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
3828,0 К			6				VO	α	УД.	N
3825,6 Ф	—	—		6	6		C <sub>2</sub>	Деландр-д'Азамбуха		p.
3825 К	3	—	—	—	—	—	O <sub>2</sub>	Жидкость		
3821 К		8					SeO			
*3814,0 К				2	2		SiN			N
3811,8 К		5			5		SO			
3809,9 Ф	10	10	10				BaF		К.	
3808 М	10						TlJ			
*3804,9 Ф	—	—			10					
3795,8 К	—	—	—			8	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы		
3792 К	—	—	—			10	BH <sup>+</sup>	Хвост кометы		
*3788,5 К	—	—			10		NO	β	Д.	N
3778,9 Ф				10			MgCl		УД.К.	
3778,5 Ф			9				GaO		К.	
3777,9 К					8		CP	А		Ar
3777,8 К	—	—	—			8	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы		
3775,4 К			10				SbO			
3774,4 К		8	8				CaCl		УД.К.	
3768,1 К	—	—	—			10	BH <sup>+</sup>			
3763,5 К		8	8				CaCl		УД.К.	
3760,3 К						10	HBr <sup>+</sup>			
3758,6 К				10			SnCl		К.	

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*3755,4Ф	—	—		10			N <sub>2</sub>	2-я положительная	УТ.	
3753,2 К			7				CaO			
3747,2 К			8				TaO			
3741,7 К	—	—		9			O <sub>2</sub>	Шумана-Рунге		
3739,8 К	5	9	8		8		S <sub>2</sub>		сф.	
3733,9 К	—	—	—			9		2-я отрицательная		He
3730,5 К		5					CHO?	Пламя этилена		
3724,9 Ф	—	—	—			8	CO <sup>+</sup>	Бальде-Джонсона	ск.	He
3720,5 Ф					6		MnBr			б.э.р.
3717,0 Ф					10		MnCl		УД.К.	б.э.р.
3712,4 К			2				SrF		К.	
3711,2 Ф	—	—	—			9	CO <sup>+</sup>	Бальде-Джонсона	Д.	He
*3710,5 Ф	—	—			8		N <sub>2</sub>	2-я положительная	УТ.	
3708,4 Ф				8			MgCl		УД.К.	
3706,6 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
3701 К		10					SeO			
3697,7 К		4					CHO?	Пламя этилена		
3693,8 К	—	—				5	BH			
3691,8 К	—	—	—			7	CO <sub>2</sub>			э.
3685,8 Ф			5				MgF		УД.К.	
3681 М	10						HNO <sub>2</sub> ?			
3680,9 Ф	—	—	—		4			Герцберга		

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3677,8 К			8				VO	$\alpha$	УД.	N
3676,2 К		7			7		SO			
3675 Ф			8				CrH			
3674,1 К	—	—	—			6	CO <sub>2</sub>			э.
3672,7 К	—	—		9			O <sub>2</sub>	Шумана-Рунге		
3665,0 К	—	—	—	—	5		He <sub>2</sub>		Д.	р.
3662,4 К	—	—				5	BH			
3661,6 К	—	—	—			6	CO <sub>2</sub>		К.	э.
3661,3 Ф					5		MnCl		УД.К.	
3656,6 К			7				CaO			
3654,3 К			2				HfO		К.	
3651,5 К				9			AuH			
*3647,2 К	—	—			4		NO	$\beta$	Д.	N
3646,3 К			3				SrF		К.	
3645,0 К	5	8	8		8		S <sub>2</sub>		сф.	
3632,3 Ф				10		10	AlH <sup>+</sup>			
3629,8 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
*3628,9 К			1		1		CN	Фиолетовая циана («хвост»)		N
3628 К	3	—	—	—	—	—	O <sub>2</sub>	Жидкость		
3628 К		1		1	1		CH			
3627,2 К					4		NH			N
3625,7 К			8				TaO			
3621,0 К	—	—	—			7	CO <sub>2</sub>			э.
3620,7 Ф			4				AgO		К.	

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3617,3 К					10		SiTe			
*3614,9 Ф			4				LaO		К.	
3612,4 К					10		CP	А		Ar
*3612,4 К	—	—	—			1	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
3611,9 Ф				10		10	AlH <sup>+</sup>			
3609,6 К					2		NH			N
3607,3 Ф	—	—		8	8		C <sub>2</sub>	Деландр-д'Азамбуха		р.
3603,7 К	—	—	—			8	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
3603,0 К					5		N <sub>2</sub>	Вегад-Каплана		э.
*3603,0 К			3		3		CN	Фиолетовая циана («хвост»)		N
3600,8 К	—	—	—			6	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы		
3599,2 Ф	7				7		InCl			б.э.р.
3594,2 Ф			10				MgF		УД.К.	
3594,1 К	10						ClO <sub>2</sub>			
3592,9 Ф	—	—		7	7		C <sub>2</sub>	Деландр-д'Азамбуха		р.
3591,6 К	—	—				10	HC1 <sup>+</sup>			
*3590,4 Ф		7	8		8		CN	Фиолетовая циана	К.	N
3590 К		10					SeO		сф.	
3588,6 К		8					CHO?	Пламя этилена		
3587,6 Ф	—	—		7	7		C <sub>2</sub>	Деландр-д'Азамбуха		р.

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3587,2 К	5	8	8		8		S <sub>2</sub>			
*3585,9 Ф		6	7		7		CN	Фиолетовая циана		N
3585,4 К			8				SnO			
3584,2 К	—	—	—			6	CO <sup>+</sup>	Хвост кометы		
*3583,9 Ф		5	6		6		CN	Фиолетовая циана		N
*3582,1 Ф	—	—	—			6	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрица- тельная	К.	He
*3576,9 Ф	—	—			10		N <sub>2</sub>	2-я положи- тельная	УТ.К.	
*3572,4 К	—	—			10		NO	β	Д.	
3567,0 К			10				BeCl		К.	
3565 К	—	—	—		10		OH <sup>+</sup>			б.э.р.
3564,0 К			9				CaO		К.	
3562,2 К	—	—	—			8	CO <sub>2</sub>			э.
3558,4 Ф			8				AgO		К.	
3556,1 К					10		SiTe			
3553,5 Ф			10				AgO			
3551,4 К	—	—	—			8	CO <sub>2</sub>			э.
3548,7 К		6			6		SO			
3545,9 К	—	—	—			9	CO <sub>2</sub>			э.
3541 М	10						HNO <sub>2</sub> ?			
*3536,7 Ф	—	—			8		N <sub>2</sub>	2-я положи- тельная	УТ.	
*3535,0 К				4	4		SiN		Д.	N
3533,8 К	—	—	—			7	CO <sub>2</sub>			э.

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3525,5 К			7				VO	α	УД.	N
3517,7 К							O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
3516,1 К	—	—		8			O <sub>2</sub>	Шумана-Рунге		
3516 К				5			AgH			
3514,3 К					10		SiTe			
3511,7Ф	—	—	—			7	CO <sup>+</sup>	Бальде-Джон-сона	ск.	He
3511,4 К	10						ClO <sub>2</sub>			
3510,8 К	—	—	—			6	CO <sub>2</sub>			э.
3508,2 К					8		CP	A		Ar
3507,3 К	—	—				10	HCl <sup>+</sup>			
3503,8 К			10				SrO		УД.К.	
3503,4 Ф			4				MgF			э.
*3503,2 К	—	—	—			6	CO <sub>2</sub>			э.
3502,7 К		8					CHO?	Пламя этилена		
3500 Ф					5		HgH			
3500,4 Ф	—	—	—			3	CO <sup>+</sup>	Бальде-Джонсона	Д.	He
3500,3 К	5	8	8		8		S <sub>2</sub>			б.э.р.
3499,0 Ф	10				10		InCl			
3494,2 К	—	—	—			8	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
3493,5 Ф			4				AgO		К.	

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*3493,3 Ф	—	—	—		6		CO	3-я положительная	Г.	
3487,8 К					10		SnCl		К.	
3485,7 К	8	10	10				PbO	D		
3484,5 К	6	10	10				SnO		К.	
3484 К		8					SeO		сф.	
3475,3 К	8						TlBr			
3475,0 К			10				CaO		К.	
3472,5 К		5					CHO?	Пламя этилена		
3469,2 К			?				SbO			
3463,6 К	8						TlBr			
3459,2 К					10		CP	A		Ar
3452,4 К	9						TlBr			
3449,2 К			2				CaF		К.	
3445,2 К			6				SrO			
3441,6 К			6				BO	β		N
3434,0 К	10						ClO <sub>2</sub>			
3429,6 К	10						TlBr			
*3428,1 К		4		4	4		OH		УД.Д.	
3424,6 К					4		N <sub>2</sub>	Вегард-Каплана		
3421,2 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
3420,5 К	—	—				10	HBr <sup>+</sup>			
3419,6 К					10		PH			
3418,2 К	9						TlBr			
3417 М	8						HNO <sub>2</sub> ?			

Продолжение таблицы Пб

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3416,1 Ф					7		FeCl			б.э.р.
3409,1 К			7				CaO		К.	
3401,9 К	8	8	8				PbO	D		
3399,7 Ф	—	—		5	5		C <sub>2</sub>	Деландр- д'Азамбуха	К.	р.
3398,1 Ф	—	—		5	5		C <sub>2</sub>	Деландр- д'Азамбуха		р.
3397,8 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрица- тельная		He
3389,8 К			6				SrO			
3389 М	4						CH <sub>2</sub> O	Формаль- дегид		
3388,3 К	8	7	7				SnO		К.	
3387,6 К			6				VO	α	УД.	N
3384,4 Ф					10		CdJ			
3383,1 К		6			6		SO			
*3381,3 к	—	—	—			1	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрица- тельная		He
*3377,5 К	—	—	—			10	CO <sub>2</sub>			э.
3377,4 К		10					CHO?	Пламя этилена		
*3376,4К	—	—			10		NO	β	Д.	N
3374,1 М	3	—	—				O <sub>3</sub>			
*3371,3 Ф	—	—			10		N <sub>2</sub>	2-я положи- тельная	УТ.К	
3371,1 К			2				CaF		К.	
*3370 М		10		10	10		NH		Л.	
*3370,0 К	—	—	—			10	CO <sub>2</sub>		К.	э.
3369,6 К	—	—		8			O <sub>2</sub>	Шумана- Рунге		

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3369,4 К	6	7	8		8		S <sub>2</sub>			
3363,5 К					10		CP	A		Ar
3363 М					10		SiF	η		
3360,5 К	10						ClO <sub>2</sub>			
*3360 М		9		9	9		NH		Л.	
3359,0 К		5					CHO?	Пламя этилена		
3348,0 К	—	—	—	—	3		He <sub>2</sub>		Д.	р.
3346 м					10		SiF	η		
3338,5 м	4	—	—		8		O <sub>3</sub>			
3332 К					5		OH <sup>+</sup>			
3330 К				10			AgH			
3323,4 К	10	8	8				SnO			
3311,9 К		8	8		8		PO	β		
3311,5 М	5	—	—		6		O <sub>3</sub>			
*3308,0 Ф	—	—	—			2	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрица- тельная	К.	He
*3305,7 Ф	—	—	—		7		CO	3-я положи- тельная	Г.	
3305,4 К			8				BO	β		N
3299,2 К		10					CHO?	Пламя этилена		
*3298,7 Ф	—	—	—			2	N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	1-я отрица- тельная		He
3297,6 К	3				7		SiS			
3296,4 К		8	8		8		PO	β		
3290,4 Ф					7		SnBr			
3288 К	6						CH <sub>2</sub> O	Формаль- дегид		

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3284,3 К	—	—	—			5	CO <sub>2</sub>			э.
3279,8 М	8	—	—		3		O <sub>3</sub>			
3277,2 К		10	10		10		AsO		УД.	
3274,8 М	8						CS <sub>2</sub>			
3273,7 К					6		CP	А		Ar
3271,0 К		10			10		SO			
3270,5 Ф			10		10		PO	β		
3269,9 К	—	—	—			7	CO <sub>2</sub>			э.
3268,9 К		8	8		8		PO	β		
3264,6 К	—	—	—			7	CO <sub>2</sub>			э.
* 3263,6 К	8						TiCl			
3262,4 К					10		SiSe			
3260 М	7						CH <sub>2</sub> O	Формаль- дегид		
3256,9 К			9				BO	β		N
3255,5 М	5	—	—				O <sub>3</sub>			
3255,3 Ф			10		10		PO	β		
3254,8 Ф					5		BF		Г.	б.э.р.
3253,9 К	—	—	—			8	CO <sub>2</sub>			э.
3253,4 К			8		8		PO	β		
*3253,4 К	—	—				5	NH			
3253 Ф	—	—	—		3		CO	Кнауса		к.
*3251,5 К	8						TiCl			
3249,7 М	8	—	—				O <sub>3</sub>			
*3246,9 К	—	—	—			8	CO <sub>2</sub>		К.	
3246,3 К		1 0	1 0		1 0		PO	β		э.

Продолжение таблицы Пб

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*3242,1 Ф	—	—	—		6		CO	5B	Г.	
*3240,6 К	8						TlCl			
*3240,1 К	—	—			2		NH			N
3236,6 К	8						SH			
3235 М	8						CS <sub>2</sub>			
3234,4 Ф					7		SnCl			
3232,5 К	—	—		7			O <sub>2</sub>	Шумана- Рунге		
3231,2 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрица- тельная		He
*3230,8 К	9						TlCl			
3227,2 М	10	—	—				O <sub>3</sub>			
3221,8 К	4				8		SiS			
3221,5 М	10	—	—				O <sub>3</sub>			
*3221,1 К	10						TlCl			
3210,8 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрица- тельная		He
3210,0 К	10						AgJ			
3209,3 К			7				BO	β		N
3207,8 К		6	7		7		AsO		УД.	
3204,4 М	9						CS <sub>2</sub>			
3203,0 К					10		SiSe			
3201,0 М	8	—	—				O <sub>3</sub>			
3200,8 К	8				9		AgCl		К.	б.э.р. ф.
3199,5 К	10						AgBr			
*3198,0К	—	—			10		NO	β	Д.	N
3197,8 Ф					7		SnCl			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3197,5 К				5			N <sub>2</sub>	Вегард-Каплана		
3194,8 М	6	—	—				O <sub>3</sub>			
*3193,2 К	7						TlCl			
3190,2 К				8			CP	A		Ar
3189,5 М	10						CS <sub>2</sub>			
3179 К				5			AgH			
3177,0 М	8	—	—				O <sub>3</sub>			
3176,6 Ф				10			CdBr			
3170,6 К		9	9	9			AsO		УД.	
3166,2 К	10			10			AgCl		К.	б.э.р. ф.
3164,8 К		10		10			SO			
3164 К	9						CH <sub>2</sub> O	Формальдегид		
*3159,3 Ф	—	—		9			N <sub>2</sub>	2-я положительная	УТ.К.	
3156,1 М	8	—	—				O <sub>3</sub>			
3145,3 К				9			SiSe			
3144.0М	8						CS <sub>2</sub>			
3143 М	8						CH <sub>2</sub> O	Формальдегид		
3143,4 К		1		1			CH			
3141,2 Ф	?						SnF		К.	б.э.р. ф.
3139,7 К	10			9			AgCl			
3138 Ф	—	—	—	4			CO	Кнауца		к.

Продолжение таблицы Пб

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3137,4М	10	—	—				O <sub>3</sub>			
*3136,0Ф	—	—			8		N <sub>2</sub>	2-я положительная	УТ.	
*3134,4 Ф	—	—	—		8		CO	3-я положительная	Г.	
*3132,9 К	—	—	—		6		CO <sub>2</sub>		К.	э.
3127,7 К	4				8		SiS		К.	
3122,1 Ф					9		BF		Г.	б.э.р.
3114,3М	8	—	—				O <sub>3</sub>			
3107,5 К	—	—	—			2	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
3106,4 К					9		SiSe			
3105,6 К		6	7		7		AsO		УД.	
3105,0 М	5	—	—		6		O <sub>3</sub>			
3103,9 К	—	—		6			O <sub>2</sub>	Шумана-Рунге		
3091,5 К	9	8	9		9		S <sub>2</sub>			
3089,5 М	8	—	—		10		O <sub>3</sub>			
3088,6 К			9				BO	β		N
*3079,9 Ф	—	—	—		5		CO	5B	Г.	
3077 Ф					7		COS?			
3064,1 К		10			10		SO			
3064,0 К	—	—	—			3	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
*3063,6 К	10	10		10	10		OH		УДД,с	
3062,8 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
3057,9 К	6				9		SiS		К.	
3047,7 Ф					9		SiBr			
3043,6 Ф					7		SnBr			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3043,6 К			9				VO	β		N
3043,6 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
3043 Ф	—	—	—		10		COS?			
3042,6 К					3		NH			N
*3042 К	7	—	—		—		SO <sub>2</sub>			
3035,2 К	—	—			1		NH			N
*3034,9 К					10		NO	β	Д.	N
3033 К	7						CH <sub>2</sub> O	Формальдегид	сф.	
3028 Ф	—	—	—		3		CO	Кнауса		к.
3024,6 К	9	7	8		8		S <sub>2</sub>			
3023,0 К	—	—	—			2	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
*3021 К	9	—	—		—		SO <sub>2</sub>			
3014,8 К		8					CHO?	Пламя этилена		
3009 Ф					10		COS?			
3009,6 К			9				BeF		УД.	
3008,8Ф					10		SiBr		ск.	
*3008,8Ф	0	4	4		4		NO	γ	УД.Д.	
*3000 К	10	—	—		—		SO <sub>2</sub>			
2999,7 К			7				VO	β		N
2990,8 К	7				10		SiS		К.	
2990,4 К				10			SnO	Лумиса и Уатсона		
2989,5 К	9	7	8		8		S <sub>2</sub>		сф.	
2988,8 Ф					8		SiCl			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2987,5 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
2984,2 К	—	—	—			2	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
*2979 К	9	—	—		—		SO <sub>2</sub>			
*2977,4 Ф	—	—	—		9		CO	3-я положительная	Г.	
*2976,8 Ф	—	—			6		N <sub>2</sub>	2-я положительная	УТ.К.	
2976,2 К	1				10		ZnCl			б.э.р.
2973,4 Ф					8		SnCl			
2970,4 Ф					8		SiCl			
2970,0 К	—	—	—			8	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
2967,1 Ф					6		SiF	β	Д.	
*2960,2 К	10	—	—		—		SO <sub>2</sub>			
2958,7 Ф					7		SiBr			
2956 Ф	8						ZnCl?			
2954,2 М					10		BBr			б.э.р.
2954,0 К	10	7	8		8		S <sub>2</sub>		сф.	
2948,2 К		7					CHO?	Пламя этилена		
2948,1 Ф					10		BBr			
2944,2 К					9		BBr			
2943 Ф					10		COS?			
*2943,0 К	9	—	—		—		SO <sub>2</sub>			
2942,6 К	5				10		ZnCl		К.	б.э.р.

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2942,2 Ф					8		SiCl			
*2936,7 К	8	—	—		—		SO <sub>2</sub>			
2935,8 Ф					10		SnCl			
2935,7 К					9		N <sub>2</sub>	Вегад-Каплана		
2935,7 К					7		BBr		К.	б.э.р.
2934 Ф	10						ZnCl?			
2934,9 К			9				BO	β		N
2931 К	10						CH <sub>2</sub> O	Формальдегид		
2927,9 Ф	?						SnF			
2926,1 К	8				10		SiS		К.	
2925 Ф	—	—	—		2		CO	Кнауса		к.
2924,4 Ф					8		SiCl			
*2923 К	8	—	—		—		SO <sub>2</sub>			
2921,7 К				10			SnO	Лумиса и Уатсона		
2920,2 К	10	7	8		8		S <sub>2</sub>		сф.	
2919,8 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
2911 Ф					10		COS?			
*2905,5 К	8	—	—		—		SO <sub>2</sub>			
2903,9 Ф	—	—	—		1		N <sub>2</sub>	4-я положительная	Г.	р.
2901,9 К	—	—	—			8	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
*2898,4 К			3		3		SiO			
2898,1 К	—				4		C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Бензол	К.	т.

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2897,2 К	—	—	—			3	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
*2896 М	—	—	—			10	CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>			
2894,4 Ф					6		SiF	β	Д.	
2892,3 К	10	7	8		8		S <sub>2</sub>			
2892,2 К			10				VO	β		N
2890,3 К	—	—	—			8	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
2887,9 К	10	7	8		8		S <sub>2</sub>			
*2886,7 К	9	—	—		—		SO <sub>2</sub>			
*2885,2 К	—	—			10		NO	β		N
2883,2 К	7				8		SiS			
2883 М	—	—	—			10	CO <sub>2</sub> <sup>+</sup>			
*2882,9 Ф					8		SiCl			
2881,7 К			10		10		GeO		К.	
2880 Ф					7		COS?			
*2875 К		2		2	2		OH			
*2871,6 К			4		4		SiO			
2868,7 К					6		AsN		УД.	
*2867 К	8	—	—		—		SO <sub>2</sub>			
2865,8 Ф					8		SiCl			
2863,7 К	8				8		SiS		К.	
2860,0 К	9	5	7		7		S <sub>2</sub>		сф.	
*2859,5 Ф	1	6	6		6		NO	γ	УДД	
2858,1 К	—	—	—			4	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
2858,0 К		6					CHO?	Пламя этилена		

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2856,8 Ф					5		CCl		Т.ск.	
*2852 К	9	—	—		—		SO <sub>2</sub>			
2850,6 К			8				BO	β		N
2844,5 К					10		CSe		Д.	б.э.р.
2843,5 Ф	10				10		TIF			
2839,7 К	—	—	—			10	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
2839 К	9						CH <sub>2</sub> O	Формальдегид	сф.	
2837,9 К	—				6		C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Бензол		т.
*2833,1 Ф	—	—	—		10		CO	3-я положительная	Г.	
*2832 К	8	—	—		—		SO <sub>2</sub>			
2829,1 К	9	5	7		7		S <sub>2</sub>		сф.	
2827,4 К		8			8		SO			
2823,7 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
2822,7 К	9				9		SiS		К.	
2820,8 К	—	—	—			5	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
*2819,8 Ф	—	—			1		N <sub>2</sub>	2-я положительная	УТ.К	
2818,3 К					9		AlBr		УД.К.	б.э.р.
2814,8 К				10			SnO	Лумиса и Уатсона		
2812,3 К	—				7		C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Бензол	К.	т.
*2811,3 К	9	8		8	8		OH		УДД. сф.	
*2810,4 Ф	0	1	2		2		NO	γ	УДД	
*2810,2 К	6						Bi <sub>2</sub>			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2809,9 К			8				BO	β		N
2809,7 Ф					10		SiCl			
*2806,3 К			8		8		SiO		К.	
2804,2 К			10		10		GeO			
*2802,6 К					4		NO	β	Д.	N
2799,7 К					9		CO	4-я положи- тельная		
2798,8 К	9	5	7		7		S <sub>2</sub>			
*2797 К	8	—	—		—		SO <sub>2</sub>			
2797,1 К		5					CHO?	Пламя этилена		
*2796,9 К	8						Bi <sub>2</sub>			
2796,3 К					9		AlBr		УД.	б.э.р.
2789,8 Ф					10		CCl		Т.ск.	
2788,8 К					10		AlBr		УД.К.	б.э.р.
2787 К	7						CH <sub>2</sub> O	Формаль- дегид		
2785,8 К	—	—	—			5	CO <sup>+</sup>	1-я отрица- тельная		He
2784,2 К					10		AsN		УД.	
*2783,7 К	6						Bi <sub>2</sub>			
2783 Ф					9		BCl		К.	б.э.р.
2783,2 К	10				9		SiS		К.	
*2780,5 К		6	7		7		SiO			
2777,9 Ф	—	—	—		2		N <sub>2</sub>	4-я положи- тельная	Г.	р.
2776,7 К	—	—	—			8	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрица- тельная	Д.	He
2769,4 К	9	5	7		7		S <sub>2</sub>			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*2768,9 К	8						Bi <sub>2</sub>			
2767,2 К					9		AlBr		УД.К.	б.э.р.
*2763,3 Ф	0	1	2		2		NO	γ	УДД	
2761,9 К	—	—	—			7	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
2760,6 К					9		N <sub>2</sub>	Вегард-Каплана		
2756 К	5						CH <sub>2</sub> O	Формальдегид		
*2755,0 К		6	6		6		SiO			
*2754,7 К		7	6		7		CS		УД.	
2753,4 К			9				VO	β		N
2752,9 К	—	—	—			6	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
2751,2 К	—				7		C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Бензол		т.
2750 Ф	—	—	—		1		CO	Каплана	Г.	Н
*2747,6 К		—			9		NO	β	Д.	N
2747 К	5						CH <sub>2</sub> O	Формальдегид		
2745,3 К	9				8		SiS		К.	
*2744,5 К	7						Bi <sub>2</sub>			
2744,0 К		6			6		SO			
2740 Ф					?		N <sub>2</sub>	Каплана 2		
2739,1 К	—				10		C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Бензол		т.
2736,5 К	—				8		C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Бензол	К.	т.
*2731,6 К	10						Bi <sub>2</sub>			
2722,3 К	—	—	—			6	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
*2722,2 Ф	3	9	9		9		NO	γ	УДД	

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2722,2 Ф					10					
*2720,7 К	8						Bi <sub>2</sub>			
2720,0 Ф					10		BC1			б.э.р.
2719,5 К					7		AsN		УД.	
2716,9 К				9			SnO	Лумиса и Уатсона		
2716,0 К		5					СНО?	Пламя этилена		
2714,2 К					8		BC1		К.	б.э.р.
2713,8 К							BO	β		N
2713,6 К	?				?		TIF		К.	
2711,3 Ф	—	—	—		3		CO	3A	Гд.	
*2710,3 К	6						Bi <sub>2</sub>			
2706,8 Ф		2	3		3		PO	γ	УД.	
2705,3 К	—	—	—			8	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная	Д.	He
2699,1 К		4			4		SO			
2697,4 К					5		NS	β		
*2693,7 К		7	9		9		SiO			
*2693,2 К		8	8		8		CS		УД.	
2692,4 Ф		3	4		4		PO	γ	УД.	
2690,8 Ф		3	4		4		PO	γ	УД.	
2689,3 Ф			5				MgF		К.	
*2685,7 Ф					7		AlCl			
2683,3 К					4		NS	β		
*2683,1 Ф					7		AlCl			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2680,0 К					4		NS			
*2680,0 Ф	0	3	5		5		NO	γ	УДД	
2678,6 К					9		C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Бензол		т.
*2677,0 К		6	6		6		CS		УД.	
2676,7 Ф		3	4		4		PO	γ	УД.	
2675,3 К			8				VO	β		N
2672,4 К	—	—	—			7	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
*2672,2 К		—			7		NO	β	Д.	
*2669,0 К		8	9		9		SiO			
*2667,4 К	1				10		C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Бензол	К.	т.
*2665,3 Ф	—	—	—		8		CO	5B	Г.	
2664,8 К		5			5		SO			
2662,9 Ф		2	3		3		PO	γ	УД.	
*2662,6 К		10	9		10		CS		УД.	
2660,5 Ф	—	—	—		5		N <sub>2</sub>	4-я положительная	Г.	р.
2659,8 К					8		BCl		К.	б.э.р.
2658,8 К		4					CHO?	Пламя этилена		
*2649,7 Ф					5		AlCl			
*2647,5 Ф					7		AlCl			
*2644,8 К		4	4		4		SiO			
2638,8 К	—	—	—			8	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
2636,3 Ф		6	7		7		PO	γ	УД.К.	
2635 Ф					?		N <sub>2</sub>	Каплана 2		
2632,7 К	—	—	—			7	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная	Д.	He

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2630 Ф	—	—	—		2		CO	Каплана		
*2623,5 К					6		AlCl			
2623,4 Ф		6	7		7		PO	γ	УД.	
2622,2 К		2			3		SO			
2620,5 Ф		7	8		8		PO		УД.	
*2620,5 К		—			6		NO	β	Д.	N
*2620,0 К					5		AlCl			
*2617,0 К					5		AlCl			
2614,6 К					4		NS	β		
*2614,4 К					10		AlCl			
2613,6 К					8		C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Бензол		т.
*2610,2 К					6		AlCl			
*2608,5 К		2		3	3		OH		УДД. сф.	
2608,0 Ф		6	7		7		PO	γ	УД.	
2607,2 К	—	—	—			8	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
*2605,9 К		9	9		10		CS		УД.	
2605,0 К					9		PN		УД.К.	
2603,8 К					10		N <sub>2</sub>	Вегад-Каплана		
*2602,6 К	2				9		C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Бензол	К.	т.
*2602,1 К		—			6		NO	β	Д.	N
2597,1 К					6		NS	β		
2596,9 Ф	—	—	—		4		CO	3А	Гд.	
*2595,7 Ф	5	10	10		10		NO	γ	УД.	
2595,5 Ф	?						SnF		УД.	

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2591 М	5	—	—				O <sub>2</sub>	Герцберга	Т.	
*2589,6 К		6	6		6		CS		УД.	
2589,0 К		2			2		SO			
*2589,0 К	9						C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Бензол	К.	
2588,0 К			8				VO	β		N
*2587,5 Ф	5	10	10		10		NO	γ	УД.	
*2587,1 К		8	5		5					
2586,5 Ф					?		N <sub>2</sub>	Ван дер Циля		
2584,8 К					5		NS	β		
2581,0 К	—	—	—			9	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрица- тельная	Д.	He
2577,7 К	—	—	—			10	CO <sup>+</sup>	1-я отрица- тельная		He
*2575,6 К		10	10		10		CS		УД.	
2575,3 К					8		CO	Камерона	Г.	He,к.
2575 К					6		CO?	Каплана		
2570,9 Ф	9	9	9		9		AsN		УД.К.	
*2563,8 К		8	5		5		SiO		К.	
*2558,6 Ф	1	3	5		5		NO	γ	УДД	
*2557,3 Ф	—	—				1	NH			
2555,0 Ф		9	10		10		PO	γ	УД.К.	
2553 М	7	—	—				O <sub>2</sub>	Герцберга	Т.	
2553,3 К					6		CO	Камерона	Г.	He,к.
*2551,8 К		—			5		NO	β	Д.	N
2551,4 К			9				VO	β		N
2550,7 Ф	—	—	—		8		N <sub>2</sub>	4-я положи- тельная	Г.	р.

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2550,3 К	—	—	—			7	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
2548,6 К		1			2		SO			
2545,5 К	—	—	—			8	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		
2543,9 Ф		6	7		7		PO	γ	УД.	
2540,4 Ф		6	10		10		PO	γ	УД.	
2539,2 Ф					7		SiF	γ	Д.	
*2539,5 К		4	5		6		CS		УД.	
2536 Ф					?		N <sub>2</sub>	Каплана 2		
2535,0 Ф					10		HgCl			б.э.р.
2532,8 К	—	—	—			7	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная		He
*2530,2 Ф	—	—				3	NH		Л.	
2529,4 Ф		6	7		7		PO	γ	УД.	
*2528,6 К	10						C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Бензол	К.	
*2523,2 К		6	6		7		CS		УД.	
2518,5 К					8		NS	β		
2518,2 К					10		PN		УД.К.	
2518 М	9	—	—				O <sub>2</sub>	Герцберга	Г.	
2518 Ф	—	—	—		2		CO	Каплана	Г.	Н
2516,5 Ф					10		HgCl			б.э.р.
2510,9 К					6		CO	Камерона	Г.	He,к.
*2509,9 К		3	4		4		SiO			
2509,8 К					6		N <sub>2</sub>	Вегад-Каплана		
2506,7 К					8		NS	β		
2504,7 Ф	10	8	8		8		AsO		УД.К.	

Продолжение таблицы Пб

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2504,6 К	—	—	—			10	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
2496,9 Ф					?		N <sub>2</sub>	Ван дер Циля		
2495,4 Ф					10		HgCl			б.э.р.
*2493,7 К		2	4		6		CS		УД.	
2491,4 К	6						NO <sub>2</sub>			
2491 К					4		CO	Камерона	Г.	He,к.
2490,6 К	10				10		GaC			б.э.р.
2489,9 Ф	—	—	—		5		CO	ЗА	Гд.	
2489 М	10	—	—				O <sub>2</sub>	Герцберга	Т.	
2488,3 К	—	—	—			6	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная	Д.	He
*2487,8 К		—			7		NO	β	Д.	N
*2486,8 К		10	7		6		SiO		К.	
*2478,7 Ф	7	10	10		10		NO	γ	УД.	
2477,9 Ф		9	10		10		PO	γ	УД.К.	
*2477,0 К		2	3		4		CS		УД.	
2476,1 К					10		Hg <sub>2</sub> <sup>+</sup>			б.э.р.
2474,2 К	—	—	—			10	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
*2471,1 Ф	7	10	10		10		NO	γ	УД.	
*2471,0 К	9						C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Бензол	К.	
2468,3 Ф		5	6		6		PO	γ	УД.	
2467,8 Ф					6		SiCl			
2465 М	9	—	—				O <sub>2</sub>	Герцберга	Т.	
2464,2 Ф		9	10		10		PO	γ	УД.	
2463,2 К					10		CO	4-я положительная		

Продолжение таблицы Пб

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2461,6 К					9		N <sub>2</sub>	Вегард-Каплана		
2460,7 К					7		NS	β		
*2460,2 К		3	4		5		CS		УД.	
2459,3 К	5						NO <sub>2</sub>			
*2459,0К		4	3		3		SiO			
2456,0 Ф					7		SiCl			
2454,6 Ф		5	6		6		PO	γ	УД.	
2453,0 Ф					5		NS	γ	УД.	
2451,8 К					6		CO	Камерона	Г.	He,к.
2451,1 К					8		PN		УД.К.	
2448,7 К					6		NS	β		
2448,0 Ф	—	—	—		10		N <sub>2</sub>	4-я положительная	Г.	р.
2445,8 К	—	—	—			10	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
*2444,8 К		2	2		3		CS		УД.	
2440 М	7	—	—				O <sub>2</sub>	Герцберга		
2439,7 Ф					4		NS	γ	УД.	
2438,5 Ф	8	3	4		4		AsO		УД.К.	
2437,1 К			10				BO	β		N
*2436,3 К			3		3		SiO			
2433,9 К					9		CO	4-я положительная		
2429,2 Ф					10		MgH			
*2427,8 К		—			7		NO	β	Д.	N
2424,1 Ф					10		MgH			

Продолжение таблицы Пб

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2419,4 К	—	—	—			8	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
2419 К	10						NO <sub>2</sub>			
*2415,9 К	5						C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Бензол	К.	
*2413,8 К		8	7		7		SiO		К.	
2411,7 Ф					?		N <sub>2</sub>	Ван дер Циля		
2409,2 К					6		CO	Камерона	Г.	He,к.
2406,0 К					4		NS	β		
2398,5 К			10				BO	β		
2396,3 Ф		7	8		8		PO	γ	УД.К.	
2394,4 К					4		NS	β		
2392,6 К	—	—	—			3	O <sub>2</sub> <sup>+</sup>	2-я отрицательная	Д.	He
2389,7 Ф	—	—	—		5		CO	3А	Гд.	
2388,8 К					6		CO	Камерона	Г.	He,к.
*2387,9 К		3	5		5		SiO			
2387,9 Ф		6	7		7		PO	γ	УД.	
2383,6 Ф					10		NS	γ	УД.	
2383,5 Ф		7	8		8		PO	γ	УД.	
2381 Ф					?		N <sub>2</sub>	Каплана I		
2377,5 К					7		N <sub>2</sub>	Вегад-Каплана		
2375,2 Ф		6	7		7		PO	γ	УД.	
2371,1 Ф					10		NS	γ	УД.	
*2370,2 Ф	9	9	9		9		NO	γ	УДД	
*2365,7 К		1	6		6		SiO			
*2364,5 К		4					SiO			
2364,5 К			8				BO	β		N

Продолжение таблицы Пб

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
*2363,5 К	3						C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Бензол	К.	
2352,5 К		—	—			6	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
2351,4 Ф	—	—	—		6		N <sub>2</sub>	4-я положительная	Г.	р.
*2344,3 К	—	4	5		5		SiO		К.	
*2342,4 К		4	1		1		SiO			
2342 М	10				10		Hg <sub>2</sub>			ф.
2333,8 Ф	9						As <sub>2</sub>			
2332,8 К					4		N <sub>2</sub>	Вегард-Каплана		
2331,3 К			7				VO	β		N
2330,4 К			6				VO	β		N
*2326,6 К		—			3		NO	β	Д.	N
2325 М	—				10		C <sub>2</sub>	Мелликена		б.э.р.
2325,2 К	—	—	—			9	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
2320,6 Ф		2	3		3		PO	γ	УД.К.	
2319,7 К	10						As <sub>2</sub>			
*2317,7 Ф	1	—			2		NO	δ	УДД	
2317,3 Ф	8		10				AlF			
2317,2 Ф					10		NS	γ	УД.	
2313,7 Ф		3	4		4		PO	γ	УД.	
2306,9 Ф			4		4		PO	γ	УД.	
2306,0 К	10						As <sub>2</sub>			
2305,2 Ф					8		NS	γ	УД.	
2301,7 Ф		3	4		4		PO	γ	УД.	
2301 Ф					?		N <sub>s</sub>	Каплана 1		

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2299,6 К	—	—	—			10	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
2298,9 К		2	6		6		SiO		К.	
2295,9 Ф	—	—	—		4		CO	3А	Гд.	
2292,7 К	10						As <sub>2</sub>			
2279,6 К	10						As <sub>2</sub>			
2278,3 К	10		10				AlF			
2276,7 Ф			4				MgF		К.	
2275,3 М	10						AlF			
*2269,4 Ф	7	5	5		5		NO	γ	УДД	
2268,6 К	—	—	—			3	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
2266,7 К	9						As <sub>2</sub>			
2266,3 Ф	?						SnF		УД.	
2264,8 К			6				BO	β		N
2263,9 К	—	—				10	HgH <sup>+</sup>			
2261,7 К					9		CO	4-я положительная		
2260,8 Ф	—	—	—		2		N <sub>2</sub>	4-я положительная	Г.	р.
2258,4 Ф					5		SiCl		Д.	
2257,7 К					1		CO	Камерона	Г.	He,к.
*2255,9 К		1	4		5		SiO		К.	
*2255,8 0				1			AlH			
2244,9 К	8						Sb <sub>2</sub>			
*2244,3 Ф	3	1	2		2		NO	γ	УДД	
2239,2 К	2						CuH			

Продолжение таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2238,3 К					9		CO	4-я положительная		
*2236,3 К		1	2		2		SiO			
2231,5 Ф					4		SiCl			
*2228,6 К				1			AlH			
*2226,8 Ф	2	—			3		NO	δ	УДД	
2225 Ф					?		N <sub>2</sub>	Каплана 1		
2222,8 К	10						Sb <sub>2</sub>			
2221,5 К					10		CO	4-я положительная		
*2221,3 Ф	2	0	2		2		NO	γ	УДД	
2217,5 Ф					?		O <sub>2</sub>	Гопфильда		p.He
*2215,4 К		0	2		2		SiO			
2214,5 К	—	—	—			5	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
2209,4 К	8						Sb <sub>2</sub>			
2196,8 К					10		CO	4-я положительная		
2189,8 К	—	—	—			10	CO <sup>+</sup>	1-я положительная		He
2188,2 К	9						C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>			
2173,0 К					9		CO	4-я положительная		
2170,0 Ф					?		O <sub>2</sub>	Гопфильда		p.He
2163,7 К	6						NH <sub>3</sub>		Д.	
2157,1 Ф	?						SnF		УД.	
*2156 Ф	5	1	3		3		NO	γ	УДД	
2153 Ф					?		N <sub>2</sub>	Каплана 1		
2143,9 Ф					6		N <sub>2</sub>	Лаймана		
*2141,2 К	3	—			4		NO	δ	УДД	

Продолжение таблицы Пб

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2137,8 К	—	—	—			6	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
2125,9 К					9		N <sub>2</sub>	Лаймана		
2123,9 К	6						NH <sub>3</sub>		Д.	
2123,1 Ф					?		O <sub>2</sub>	Гопфильда		р.Не
2113,1 К					9		CO	4-я положительная		
2112,4 К	—	—	—			8	CO <sup>+</sup>	1-я отрицательная		He
2112,1 Ф					?		N <sub>2</sub>	Каплана 1		
2093,1 К	10						C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>			
2089,9 К					10		CO	4-я положительная		
2084,1 К	7						NH <sub>3</sub>		Д.	
2076,6 Ф					?		O <sub>2</sub>	Гопфильда		р.Не
2074,4 К					10		ZnCl			б.э.р.
2067,6 К					10		CO	4-я положительная		
*2062 Ф	3				3		NO	δ	УДД	
2059,6 К	6						CO	Камерона	Г.	He,к.
2046,3 К					10		CO	4-я положительная		
2045,7 К	9						NH <sub>3</sub>		Д.	
2041,2 К					10		N <sub>2</sub>	Лаймана		
2030,8 Ф					?		O <sub>2</sub>	Гопфильда		р.Не
2025,8 К					9		CO	4-я положительная		
2023,5 К					7		N <sub>2</sub>	Лаймана		

Окончание таблицы П6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2010,9 К	10						NH <sub>3</sub>			
2007,0 К	1						C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>			
2006,0 К					4		N <sub>2</sub>	Лаймана		

# УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Г. С. Батурова, Л. А. Кипрова

## СПЕКТРЫ ПЛАМЕН

*Ответственный за выпуск проф. И. А. Абдуллин*

*Компьютерная верстка С.Ф.Медведева*

Лицензия № 020404 от 6.03.97

Подписано в печать 3.07.2014

Формат 60x84 1/16

Бумага офсетная

Печать RISO

12,09 усл. печ. л.

13,0 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз.

Заказ «С» 79

Издательство Казанского национального  
исследовательского технологического университета

Офсетная лаборатория Казанского национального  
исследовательского технологического университета

420015, Казань, К. Маркса, 68