УДК 533.9+539.186.1:546.292

ПРОВЕРКА УРАВНЕНИЯ БАЛАНСА ДЛЯ ВОЗБУЖДЕННЫХ УРОВНЕЙ НЕОНА С ПОМОЩЬЮ СТАТИСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

В. С. Кривченкова и *А. Д. Хахаев*

В условиях положительного столба в неоне при давлениях газа 1÷30 мм рт. ст. и в диапазоне изменения силы тока от 10 до 400 ма в цилиндрической трубке диаметром 28 мм исследованы электрокинетические характеристики плазмы и заселенности возбужденных состояний. С помощью дисперсионного анализа выявлена зависимость отношения числа ступенчатых возбуждений к числу квантов, излучаемых с рассматриваемых уровней от условий в плазме, и показано, что для различных по квантовой природе состояний влияние условий эксперимента существенно различно. Установлены особенности взаимодействия возбужденных атомов в состояниях, соответствующих различным электронным конфигурациям, с компонентами плазмы и найдены количественные оценки для характеристик этого взаимодействия.

В работах [1-6] показано, что в условиях средних давлений основным процессом заселения возбужденных уровней инертных газов является ступенчатое возбуждение электронным ударом, основным процессом разрушения — спонтанное излучение. При больших давлениях ($p \geqslant 10$ мм рт. ст.) замечено влияние дополнительных процессов. Природа этих процессов осталась невыясненной.

Примем в качестве нулевой гипотезы, что уравнение баланса для некоторого возбужденного уровня x неона включает только ступенчатое возбуждение и спонтанное излучение. Тогда можно записать

$$\frac{n_e \sum_s n_s \langle \sigma v \rangle_{sx}}{n_x \sum_k A_{xk}} = 1, \tag{1}$$

где n_e, n_s, n_x — концентрация электронов, концентрация атомов на уровнях $2p^5 3s$, концентрация атомов на уровне x соответственно; $\langle \sigma v \rangle_{sx}$ — усредненное по распределению скоростей электронов сечение ступенчатого возбуждения; A_{xk} — вероятность спонтанного перехода $x \to k$. Если подобное уравнение баланса не имеет места, то отношение, записанное в левой части уравнения (1), будет некоторой функцией условий эксперимента

$$\frac{n_e \sum_s n_s \langle \sigma v \rangle_{sx}}{n_x \sum_k A_{xk}} = K(i, p). \tag{2}$$

Соотношение (1) было проверено для возбужденных уровней неона при следующих условиях эксперимента: разряд в постоянном токе в трубке диаметром 28 мм при давлении 1÷30 мм рт. ст. и токах 0.4÷0.025 а. Для этого методом двух зондов [7] были определены значения напряженности электрического поля и электронной температуры. Концентрация электронов вычислялась из уравнения токового баланса. Значения концентрации атомов в состояниях $2p^5 3s$ находились двумя методами: для давлений 1÷3 мм рт. ст. использован метод определения коэффициента поглощения по контурам спектральных линий [8], для более высоких давлений использовался интегральный метод поглощения [9]. Абсолютная интенсивность излучения спектральных линий находилась путем сравнения излучения разряда с эталонным источником сплошного излучения (банд-лампой). Вероятности спонтанных переходов вычислялись по методу Бейтса—Дамгаард [10] в предположении, что для возбужденного атома неона справедлива jl-связь [11–13]. При вычислении усредненных по распределению скоростей сечений ступенчатого возбуждения уровней радиальные интегралы также определялись по методу Бейтса—Дамгаард. Для уровней $2p^53s$ использовалась LS-связь, для остальных возбужденных уровней — jl-связь. Значения $\langle \sigma v \rangle_{sx}$ вычислялись с помощью таблиц, приведенных в [14]. Отношение числа ступенчатых возбуждений уровня x к числу его спонтанных разрушений было вычислено для всех условий эксперимента (40 точек). Для обработки и анализа экспериментальных данных применялись методы математической статистики.

Как известно [15], выполнение основных предпосылок статистического анализа экспериментальных данных сводится к следующему.

1) значения результатов наблюдений K_1, $K_2, \ldots,$ K_N представляют собой независимые нормально распределенные случайные величины;

2) дисперсии $\sigma^2\{K\}$ равны друг другу (выборочные оценки $s^2\{K\}$ однородны);

3) ошибка эксперимента ξ_{ik} — случайная величина, имеющая нормальное распределение, нулевое среднее и дисперсию $\sigma^2\{K\}$;

4) независимые переменные, относительно которых проводится анализ, измеряются с пренебрежимо малой ошибкой по сравнению с ошибкой в определении значения выходной величины K и не взаимодействуют друг с другом.

Выполнимость этих предпосылок для параметра K проверялась следующим образом.

1. Проверка гипотезы нормальности распределения результатов наблюдений K была проведена с помощью критерия ω^2 по совокупности малых выборок [16]. Были рассмотрены выборки, состоящие из 4 значений параметра K при одних и тех же условиях ($i=100$ ма, $p=10$ мм рт. ст.) для 40 уровней неона ($n=40$). Вычисленное значение $n\,\omega^2$ лежит в области допустимых значений, левее критического предела.

2. Проверка гипотезы об однородности ряда дисперсий осуществлялась с помощью приема Бартлета [16]. Для величины $G_{\max}$

$$G_{\max} = \frac{s^2_{\max}}{s_1^2 + s_2^2 + \ldots + s_m^2} \tag{3}$$

(где m — число выборок, 1, 2, . . ., m — номер выборки) известен закон распределения, с помощью которого построены таблицы. Для подтверждения гипотезы об однородности должно выполняться условие $G_{\max} < G_{\text{табл.}}$. Результаты проверки однородности дисперсий представлены в табл. 1.

Таблица 1

Проверка однородности ряда дисперсий

	$N_{kb}=n_xA_{xk}$, $\lambda=5031$ Å	n_e	T_e	E	n_s
$G_{\max}$	0.103	0.14	0.138	0.112	0.275
$G_{\text{табл.}}$	0.138	0.158	0.158	0.158	0.3

3. Так как случайная ошибка определяется в основном неточностью установления давления или тока в разрядной трубке, колебаниями напряжения в сети, инерционностью регистрирующей системы и т. п., то естественно ожидать, что средняя величина случайной ошибки $M\varepsilon_{ik}=0$.

Если имеются систематические погрешности, то их наличие следует учитывать при интерпретации результатов.

4. В качестве независимых параметров были выбраны ток, протекающий через разрядную трубку (i) и давление газа (p) в трубке при выключенном разряде. Очевидно, что ошибки в определении значений i и p много меньше, чем ошибки в определении значений K.

Дисперсионный анализ значений параметра K, проведенный при 5%-м уровне значимости, выявил 4 различных по поведению типа уровней

$$K = \mathrm{const}, \quad K = f(i), \quad K = f(p), \quad K = f(i, p). \tag{4}$$

Однако, уравнения (2), (4) не дают информации о том, какие процессы влияют на заселенность возбужденных уровней. Чтобы подойти к решению этой задачи, необходимо выразить параметр K как функцию концентраций нейтральных и заряженных частиц. Вид этой функции определяется совокупностью тех процессов (за исключением рассмотренных), которые могут влиять на заселенность возбужденных уровней неона.

Основываясь на литературных данных [1, 2, 17], в которых рассмотрены многочисленные процессы, способные влиять на заселенность возбужденных уровней инертных газов, запишем уравнение баланса для возбужденного уровня x в виде

$$\begin{aligned} & n_e n_0 \langle\sigma v\rangle_{0x} + n_e \sum_s n_s \langle\sigma v\rangle_{sx} + \sum_j n_j A_{jx} + \sum_k n_k B_{kx} \rho(\nu_{kx}) + n_e^2 \langle\sigma v\rangle_{ix}^r + \\ & + n_e \sum_j n_j \langle\sigma v\rangle_{jx}^e + n_e \sum_k n_k \langle\sigma v\rangle_{kx}^e + n_0 \sum_j n_j \langle\sigma v\rangle_{jx}^a + n_0 \sum_k n_k \langle\sigma v\rangle_{kx}^a + \\ & + n_e n_{\text{м}}^+ \langle\sigma v\rangle_{\text{м}x} + n_e n_{\text{м}}^* \langle\sigma v\rangle_{\text{м}x}^* + n_{\text{м}}^* B_{\text{м}x} \rho(\nu) = n_x \sum_k A_{xk} + n_e n_x \sum_j \langle\sigma v\rangle_{xj}^e + n_e n_x \times \\ & \times \sum_k \langle\sigma v\rangle_{xk}^e + n_0 n_x \sum_j \langle\sigma v\rangle_{xj}^a + n_0 n_x \sum_k \langle\sigma v\rangle_{xk}^a + n_e n_x \langle\sigma v\rangle_{xi} + n_0 n_x \langle\sigma v\rangle_{x\text{м}} + n_e n_x \langle\sigma v\rangle_{x0} + \\ & + n_x \sum_j B_{xj} \rho(\nu_{jx}) + n_x B_{xi} \rho(\nu_i) + n_e n_0 n_x \langle\sigma v\rangle_{ea}^{tr} + n_0^2 n_x \langle\sigma v\rangle_{aa}^{tr}. \end{aligned} \tag{5}$$

Здесь n_j, n_k, n_0 — концентрация атомов на уровнях j, k, 0 соответственно; $n_{\text{м}}^*$, $n_{\text{м}}^+$ — концентрация возбужденных молекул и молекулярных ионов соответственно; $\langle\sigma v\rangle$ — усредненные по распределению скоростей сечения различных процессов; B — коэффициенты фотопоглощения, фотоионизации, фотодиссоциации; $\rho(\nu)$ — плотность излучения; A — вероятность спонтанных переходов.

В левой части уравнения (5) записаны последовательно следующие процессы, ведущие к заселению уровня x: прямое возбуждение электронным ударом, ступенчатое возбуждение электронами, каскадные переходы, поглощение излучения, рекомбинация электронов и атомарных ионов, удары 2-го рода с электронами, удары 1-го рода с электронами, удары 2-го рода с атомами, удары 1-го рода с атомами, диссоциативная рекомбинация, диссоциация электронным ударом, фотодиссоциация.

В правой части уравнения записаны процессы, ведущие к разрушению уровня x: спонтанное излучение, удары 1-го рода с электронами, ведущие к возбуждению, удары 2-го рода с электронами, удары 1-го рода с атомами, удары 2-го рода с атомами, удары 1-го рода с электронами, ведущие к ионизации, столкновения с атомами, ведущие к образованию молекул или молекулярных ионов, диссоциация при столкновении с возбужденным атомом, перезарядка, фотовозбуждение, фотоионизация, тройные столкновения возбужденных атомов с нормальными атомами и электронами, тройные столкновения возбужденных и нормальных атомов.

Уравнение (5) показывает, что параметр K следует искать в виде следующей функции концентраций электронов и атомов:

$$K = b_0 + b_1 \bar{n}_e + b_2 \bar{n}_a + b_{12} \bar{n}_e \bar{n}_a + b_{11} \bar{n}_e^2 + b_{22} \bar{n}_a^2. \tag{6}$$

Здесь $\tilde{n}_e = n_e \cdot 10^{-11}$ см$^{-3}$, $\tilde{n}_a = n_a \cdot 10^{-16}$ см$^{-3}$,

$$b_0 = 1 + \frac{\sum\limits_j B_{xj}\rho(\nu_{jx})}{\sum\limits_k n_x A_{xk}} + \frac{B_{xi}\rho(\nu_i)}{\sum\limits_k A_{xk}} - \frac{\sum\limits_j n_j A_{jx}}{\sum\limits_k n_x A_{xk}} - \frac{\sum\limits_k n_k B_{kx}\rho(\nu_{xk})}{\sum\limits_k n_x A_{xk}} - \frac{n^*_{\text{м}} B_{\text{м}x}\rho(\nu)}{\sum\limits_k n_x A_{xk}}, \tag{7}$$

$$b_1 = \left(\frac{\sum\limits_j \langle\sigma v\rangle^e_{xj}}{\sum\limits_k A_{xk}} + \frac{\sum\limits_k \langle\sigma v\rangle^e_{xk}}{\sum\limits_k A_{xk}} + \frac{\langle\sigma v\rangle_{xi}}{\sum\limits_k A_{xk}} + \frac{\langle\sigma v\rangle_{x0}}{\sum\limits_k A_{xk}} - \right.$$

$$\left. - \frac{\sum\limits_j n_j \langle\sigma v\rangle^e_{jx}}{\sum\limits_k n_x A_{xk}} - \frac{\sum\limits_k n_k \langle\sigma v\rangle^e_{kx}}{\sum\limits_k n_x A_{xk}} - \frac{n^*_{\text{м}} \langle\sigma v\rangle^*_{\text{м}x}}{\sum\limits_k n_x A_{xk}} - \frac{n^+_{\text{м}} \langle\sigma v\rangle_{\text{м}x}}{\sum\limits_k n_x A_{xk}} \right) \cdot 10^{11}, \tag{8}$$

$$b_2 = \left(\frac{\sum\limits_j \langle\sigma v\rangle^a_{xj}}{\sum\limits_k A_{xk}} + \frac{\sum\limits_k \langle\sigma v\rangle^a_{xk}}{\sum\limits_k A_{xk}} + \frac{\langle\sigma v\rangle_{x\text{м}}}{\sum\limits_k A_{xk}} - \frac{\sum\limits_k n_k \langle\sigma v\rangle^a_{kx}}{\sum\limits_k n_x A_{xk}} - \frac{\sum\limits_j n_j \langle\sigma v\rangle^a_{xj}}{\sum\limits_k n_x A_{xk}} \right) \cdot 10^{16}, \tag{9}$$

$$b_{12} = \left(\frac{\langle\sigma v\rangle^{tr}_{ea}}{\sum\limits_k A_{xk}} - \frac{\langle\sigma v\rangle_{0x}}{\sum\limits_k n_x A_{xk}} \right) \cdot 10^{27}, \tag{10}$$

$$b_{11} = \left(- \frac{\langle\sigma v\rangle^r_{ix}}{\sum\limits_k n_x A_{xk}} \right) \cdot 10^{22}, \tag{11}$$

$$b_{22} = \left(\frac{\langle\sigma v\rangle^{tr}_{aa}}{\sum\limits_k A_{xk}} \right) \cdot 10^{32}. \tag{12}$$

Численные значения коэффициентов b уравнения (6) были определены путем регрессионного анализа [15] параметров K. В качестве независимых переменных по-прежнему брались ток и давление. Регрессионный анализ параметров K позволил найти для каждого из уровней явный вид функции (4). Регрессионный анализ значений концентраций электронов и атомов определил вид функций

$$n_e = \varphi(i, p), \quad n_a = \gamma(i, p). \tag{13}$$

Совокупность (4) и (13) определяет функцию $K = F(n_e, n_a)$, т. е. позволяет находить численные значения коэффициентов уравнения (6).

Оценка значимости коэффициентов регрессии определялась по критерию Стьюдента (для уровня надежности 95%). Значения коэффициентов b приведены в табл. 2.

В табл. 3 показана устойчивость коэффициентов регрессии по отношению к ошибкам эксперимента для некоторых уровней неона.

Пять уравнений с различными значениями коэффициентов b получены при регрессионном анализе варьируемых параметров K, концентраций электронов и концентраций нормальных атомов. Уровень вариаций определялся значениями $s\{K\}$, $s\{n_e\}$, $s\{n_a\}$, умноженными на случайные числа, распределенные по закону Гаусса. При этом уровень надежности был задан равным 95%.

Как следует из табл. 2, для всех уровней неона коэффициент $b_0 > 0$. Для уровней конфигураций с одинаковым l коэффициенты b_0 уменьшаются с увеличением главного квантового числа n. При малых токах и давлениях всеми коэффициентами уравнения баланса, кроме коэффициентов b_0, можно пренебречь. Если при этом значение K близко к единице, то такие уровни при малых токах и давлениях могут быть описаны уравнением баланса типа (1). Для неона это уровни $2p^5 3p$, а также большинство уровней $2p^5 4d$-, $2p^5 5d$-конфигураций. Из соотношения (8) видно, что коэффициент b_1 определяется разностью вкладов процессов заселения и

Таблица 2

Коэффициенты уравнения регрессии для уровней неона

Уровень	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
			$2p^5 3p$			
$2p_1$	1.6	0	0	0	0	0
$2p_2$	1.6	0	0	0	0	0
$2p_3$	3.2	0	−0.092	0	0	0.0016
$2p_4$	1.2	0	0	0	0	0
$2p_5$	1.8	0	0	0	0	0
$2p_6$	1.7	0	0	0	0	0
$2p_7$	2.7	−0.11	−0.06	0.03	−0.0005	0
$2p_8$	2.1	0	−0.074	0	0	0.0026
$2p_9$	2.9	−0.14	−0.016	0.0054	0	−0.001
$2p_{10}$	1.4	0	0.042	0	0	0
			$2p^5 4p$			
$3p_1$	36	1.3	−1.7	0.092	−0.032	0.016
$3p_2$	0.088	−0.023	$-5.2\cdot10^{-4}$	$1.8\cdot10^{-4}$	0	$-3.2\cdot10^{-5}$
$3p_3$	0.53	0.019	−0.019	$4.5\cdot10^{-4}$	−0.0013	$1.6\cdot10^{-4}$
$3p_4$	0.12	0	0	0	0	0
$3p_5$	0.55	0	0	0	0	0
$3p_6$	1.9	0	−0.059	0	0	$7.2\cdot10^{-4}$
$3p_7$	0.45	0.0054	−0.016	0	0	$1.9\cdot10^{-4}$
$3p_8$	0.021	0.0025	$-4.4\cdot10^{-4}$	$5.8\cdot10^{-5}$	$-1.7\cdot10^{-4}$	$-5.2\cdot10^{-6}$
$3p_9$	0.45	0.0054	−0.016	0	0	$2\cdot10^{-4}$
$3p_{10}$	0.0031	$2.6\cdot10^{-4}$	$-5.1\cdot10^{-5}$	$-5.9\cdot10^{-6}$	0	$1.1\cdot10^{-6}$
			$2p^5 3d$			
$3s_1'$	2.4	0	0.06	0	0	0
$3s_1''$	23	0	0.5	0	0	0
$3d_2$	4.7	0	0.18	0	0	0
$3d_3$	1.9	0.061	0.16	0.019	0	−0.034
$3d_5$	23	−1.9	0.81	0.16	0	−0.028
$3d_3$	0.56	0	0.1	0	0	0
			$2p^5 4d$			
$4s_1'$	1.3	0	0	0	0	0
$4s_1''$	1.2	0	0.053	0	0	0
$4s_1'''$	2.8	0	0	0	0	0
$4s_1''''$	−0.075	0.034	0.02	0	0	0
$4d_1'$	0.28	0	0.016	0	0	0
$4d_1''$	0.87	0	0.041	0	0	0
$4d_2$	0.97	0	0.049	0	0	0
$4d_3$	0.21	0.07	0.029	0	0	0
$4d_4$	20	1.1	0.37	0	0	0
$4d_5$	1.5	0.082	0.032	0	0	0
$4d_6$	2.0	−0.079	0.013	0.0059	0	−0.0011
			$2p^5 5d$			
$5s_1'$	0.47	0	0	0	0	0
$5s_1''$	1.6	0	0	0	0	0
$5d_1'$	0.34	0	0	0	0	0
$5d_1''$	0.24	0.04	0.016	0	0	0
$5d_2$	0.5	0	0	0	0	0

Уровень	b_0	b_1	b_2	b_{12}	b_{11}	b_{22}
			$2p^55p$			
$4p_1$	5.2	−0.16	−0.24	0.0039	−0.11	0.0026
$4p_2$	0.0023	0	0	0	0	0
$4p_3$	0.092	0	−0.012	0	0	0
$4p_4$	0.0039	0	$-4.4\cdot10^{-5}$	0	0	0
$4p_5$	0.01	0	0	0	0	0
$4p_6$	0.058	$-6.5\cdot10^{-4}$	$-1.7\cdot10^{-3}$	$5.2\cdot10^{-4}$	0	$7.5\cdot10^{-6}$
$4p_7$	0.05	$6\cdot10^{-4}$	$-1.5\cdot10^{-3}$	0	0	$1.7\cdot10^{-5}$
$4p_8$	0.0017	$8.6\cdot10^{-5}$	$-6.6\cdot10^{-5}$	$2\cdot10^{-6}$	$-6\cdot10^{-6}$	$4.5\cdot10^{-7}$
$4p_9$	0.032	0	$-8.9\cdot10^{-4}$	0	0	$9.9\cdot10^{-6}$
$4p_{10}$	0.0031	0	$-3.6\cdot10^{-5}$	0	0	0
			$2p^55s$			
$3s_2$	4.9	0	0	0	0	0
$3s_3$	0.66	0.26	0.058	0	0	0
$3s_4$	0.92	0	0	0	0	0
$3s_5$	0.39	−0.014	0	0.0018	$-3.3\cdot10^{-4}$	0
			$2p^56s$			
$4s_2$	0.6	0	0	0	0	0
$4s_3$	0.072	0.019	0.012	0	0	0
$4s_4$	0.23	0	0	0	0	0
$4s_5$	0.15	−0.0027	0.002	$4.9\cdot10^{-4}$	0	$-8.7\cdot10^{-5}$
$5d_3$	0.41	0	0	0	0	0
$5d_4$	2.6	0.2	0.016	0	0	0
$5d'_4$	0.02	0.063	0.02	0	0	0
$5d_5$	0.92	0	0	0	0	0

Таблица 3

Устойчивость коэффициентов регрессии

№ п/п	Уровень						
	$2p_7$		$2p_{10}$		$2p_8$		
	b_0	b_2	b_0	b_2	b_0	b_2	b_{22}
1	1.74	0.020	1.2	0.042	2.4	−0.08	0.0026
2	1.54	0.020	1.0	0.042	2.0	−0.10	0.0025
3	1.54	0.025	1.0	0.048	2.0	−0.08	0.0025
4	1.6	0.026	1.2	0.047	2.0	−0.10	0.0023
5	1.57	0.022	1.4	0.038	1.9	−0.06	0.0021
Среднее	1.6	0.023	1.16	0.043	2.06	−0.08	0.0024
$\Delta b/b$, %	5	12	15	4	10	21	10

разрушения уровней при взаимодействии с электронами и может иметь разные знаки, что и наблюдается в табл. 2. Коэффициенты b_2 определяются, согласно (9), разностью процессов заселения и разрушения уровней при взаимодействии с невозбужденными атомами. Из табл. 2 видно, что для p-уровней неона коэффициент $b_2 < 0$, для s- и d-уровней — $b_2 > 0$. В связи с этим можно высказать предположение о преимущественном разрушении уровней s- и d-конфигураций атомным ударом с переводом возбужденных атомов в p-состояния. Следует отметить, что коэффициенты b_{12}, b_{11}, b_{22} дают заметный вклад в уравнения баланса только при больших значениях концентраций электронов и атомов.

Из данных табл. 2 следует, что для уровней d-конфигураций с ростом n вид уравнений баланса упрощается — в уравнениях исчезают квадратичные члены; для уровней s-конфигураций с ростом n вид уравнений не меняется, зато четко выражено различное поведение «резонансных» уровней s_2 и s_4 и «метастабильных» s_3 и s_5.

В заключение можно сказать, что выбор соответствующих условий эксперимента и увеличение точности экспериментальных и расчетных результатов относительно параметра K позволят подойти к определению сечений различных процессов, входящих в уравнение баланса.

Авторы выражают благодарность Л. А. Луизовой за ценные замечания и дискуссию по результатам работы.

Литература

[1] С. Э. Фриш, В. Ф. Ревалд. Опт. и спектр., *15*, 726, 1963.
[2] Ю. М. Каган, Р. И. Лягущенко, А. Д. Хахаев. Опт. и спектр., *14*, 5, 1963.
[3] Ю. М. Каган, Р. И. Лягущенко, А. Д. Хахаев. Опт. и спектр., *15*, 13, 1963.
[4] В. С. Кривченкова, Л. М. Федорова, А. Д. Хахаев. Ж. прикл. спектр., *13*, 6, 1970.
[5] Э. Г. Гневышева, В. С. Кривченкова, В. Н. Тихонов, И. П. Шибаев, А. Д. Хахаев. Опт. и спектр., *22*, 539, 1967.
[6] Л. Б. Разумовская. Опт. и спектр., *23*, 845, 1967.
[7] Ю. М. Каган, В. И. Перель. Усп. физ. наук, *81*, 3, 1963.
[8] Л. А. Луизова, А. Д. Хахаев. Опт. и спектр., *22*, 640, 1967.
[9] С. Э. Фриш, О. П. Бочкова. Вестн. ЛГУ, № 16, 1961.
[10] D. Bates, A. Damgaard. Phil. trans. Roy. Soc., *A242*, 101, 1949.
[11] И. И. Собельман. Введение в теорию атомных спектров. Физматгиз, М., 1963.
[12] А. Н. Беннет. Усп. физ. наук, *31*, 119, 1963.
[13] В. Я. Велдре, А. В. Ляш, Л. Л. Рабик. Опт. и спектр., *19*, 319, 1965.
[14] Л. А. Вайнштейн, И. И. Собельман. Препринт ФИАН СССР, № 66, М., 1967.
[15] В. В. Налимов, Н. А. Чернова. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. Изд. «Наука», М., 1965.
[16] Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. Курс теории вероятности и математической статистики для технических приложений. Изд. «Наука», М., 1969.
[17] С. Э. Фриш. Оптические спектры атомов. Физматгиз, М.—Л., 1963.

Поступило в Редакцию 26 февраля 1973 г.