

# Исследование срока службы УФ Cu + Ne–CuBr-лазера статистическими методами

И.П.Илиев, С.Г.Гочева-Илиева

С использованием большого количества экспериментальных данных проведено статистическое исследование зависимости среднего срока службы УФ Cu + Ne–CuBr-лазера от десяти входных физических параметров. Установлено, что только три из них существенно влияют на срок службы исследуемого лазера. Проведен физический анализ и осуществлена интерпретация полученных результатов.

**Ключевые слова:** ультрафиолетовый лазер на парах бромида меди, время жизни лазера, иерархический кластерный анализ, факторный анализ, регрессия главных компонентов.

## 1. Введение

Одной из важнейших выходных характеристик различных лазеров, в том числе лазеров на парах металлов и их соединений, является выходная мощность лазерного излучения. С использованием известных данных можно определить степень влияния на выходную мощность независимых физических параметров, таких как подводимая электрическая мощность, геометрические размеры, тип использованных конструкционных материалов, вид и давление газов, температура разряда, энергия электронов и другие. Кроме того, часто исследуется и другая выходная характеристика лазерного излучения – его эффективность.

Однако такая характеристика лазера, как срок его службы, исследована очень мало, хотя она исключительно важна при эксплуатации лазера, определяя его надежность.

Целью настоящей работы является выявление основных физических параметров, определяющих средний срок службы лазеров, путем их классификации с использованием классических статистических методов, таких как кластерный анализ, факторный анализ и регрессионный анализ главных компонентов.

Для конкретного решения задачи выбран лазер на парах галогенида меди, излучающий в УФ области спектра [1–3]. Приведенные в работах [1–3] экспериментальные данные для срока службы лазеров данного типа будут использоваться при проведении статистического анализа.

Исследования проводились с помощью статистического пакета SPSS [4].

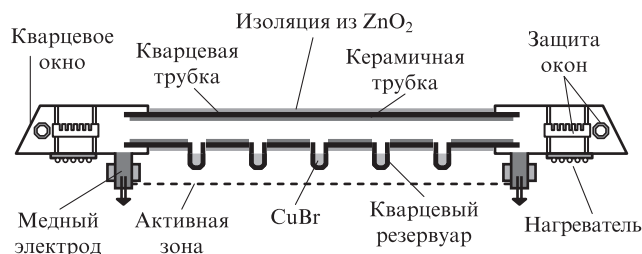


Рис.1. Схема лазерной трубки УФ Cu + Ne–CuBr-лазера.

## 2. Общее описание УФ Cu + Ne–CuBr-лазера

Исследуемый тип лазера разрабатывается в Лаборатории лазеров на парах металлов Института физики твердого тела им. Георгия Наджакова Болгарской академии наук с 1999 г. [5]. Лазер излучает в УФ части спектра на длинах волн 248.6, 252.9, 259.7, 260.0 и 270.3 нм. Экспериментально достигнута выходная мощность 1.3 Вт на всех пяти линиях и 0.85 Вт – на линии с  $\lambda = 248.6$  нм. Установлено, что добавление малых количеств водорода (0.02–0.04 Тор) увеличивает мощность лазерной генерации почти в два раза [3].

Схема лазерной трубки показана на рис.1. В качестве источника стабильного УФ излучения Cu + Ne–CuBr-лазер применяется для записи информации, для высококачественной резки и сверления различных материалов при минимальном механическом и термическом повреждении, а также широко используется в химии, медицине, спектроскопии и других областях науки и техники [6].

## 3. Исходные данные

В настоящей работе рассматриваются следующие десять независимых входных лазерных параметров (переменных):  $D$  (мм) – внутренний диаметр лазерной трубки,  $D_r$  (мм) – внутренний диаметр диафрагм,  $L$  (см) – длина активной зоны (расстояние между электродами),  $P_{in}$  (Вт) – подводимая электрическая мощность,  $P_L$  (кВт/см) – погонная электрическая мощность на единицу длины с учетом потерь,  $P_{rf}$  (кГц) – частота следования электрических импульсов,  $p_{Ne}$  (Тор) – давление буферного газа неона,  $p_{H_2}$  (Тор) – давление добавочного газа водорода,  $C$  (нФ) –

I.P.Iliev. Department of Physics, Technical University, Plovdiv, 25 Tzanko Dzhushtabanov St, 4000 Plovdiv, Bulgaria;

e-mail: iliev55@abv.bg

S.G.Gocheva-Ilieva. Department of Applied Mathematics and Modeling, Faculty of Mathematics and Informatics, Paisii Hilendarski University of Plovdiv, 24 Tzar Assen St, 4000 Plovdiv, Bulgaria; snow@uni-plovdiv.bg

Поступила в редакцию 29 декабря 2012 г., после доработки – 17 апреля 2013 г.

эквивалентная ёмкость конденсаторной батареи,  $T_r$  (°C) – температура резервуара с CuBr.

В качестве зависимой переменной будет рассматриваться  $L_{\text{time}}$  – время жизни лазеров.

В исследовании использованы значения этих переменных из  $n = 238$  проведенных экспериментов. Данные опубликованы в работах [1–3].

#### 4. Классификация параметров методом кластерного анализа

Метод кластерного анализа состоит из множества вычислительных процедур, с помощью которых некоторая выборка данных или объектов разбивается на непересекающиеся подмножества, называемые кластерами. Имеющиеся данные можно классифицировать по переменным или по наблюдениям. Мы будем использовать первый вариант. Группирование в кластерах схожих объектов проводится согласно выбранному критерию «близости» («сходства»). Цель классификации переменных – получить оптимальную группировку, в которой объекты в каждом кластере сходны, а сами кластеры сильно различаются между собой.

Для количественной оценки понятия близости используется понятие метрики (расстояния) в векторном пространстве. Наличие сходства или различия между двумя точками пространства определяется расстоянием между ними. Чем оно больше, тем больше различие, и наоборот. Обычно в качестве метрики берется квадрат евклидова расстояния между двумя векторами [4].

Методы формирования кластеров при так называемом иерархическом подходе включают в себя агломеративные (объединительные) и дивизивные (разделяющие) методы. Мы будем использовать иерархический агломеративный метод, который рекомендуется для малых выборок ( $n \leq 500$ ). На каждом этапе в новый кластер объединяются те кластеры, расстояние между которыми минимально. Объединение кластеров проводится с помощью выбранного метода кластеризации – путем вычисления некоторого типа расстояния между кластерами, зависящего от заданной метрики. Чаще всего используются такие методы кластеризации, как метод межгрупповых связей и метод ближайшего соседа (метод одиночной связи). Более подробное описание этапов кластерного анализа и его применения с помощью пакета SPSS можно найти, например, в работе [4].

Чтобы определить оптимальное количество кластеров, удобно использовать графическое представление решений в виде дендрограммы [4]. Для исследованных переменных дендрограмма представлена на рис.2. Оптимальное решение получается при числе кластеров  $k = 3$ , когда наблюдается самое большое разделение кластеров (больше пяти делений шкалы с общей стандартной длиной в 25 единиц). Таким образом, методом кластерного анализа получаем оптимальную группировку всех переменных в следующих трех кластерах:

$$\begin{aligned} \text{кластер 1: } & \{D, D_r\}, \\ \text{кластер 2: } & \{P_{in}, L, P_L, P_{rf}, p_{Ne}, T_r\} \\ \text{кластер 3: } & \{p_{H_2}, C, L_{\text{time}}\}, \end{aligned} \quad (1)$$

Из рис.2 и оптимального решения (1) можно заключить, что зависимая переменная  $L_{\text{time}}$  наиболее однородна с

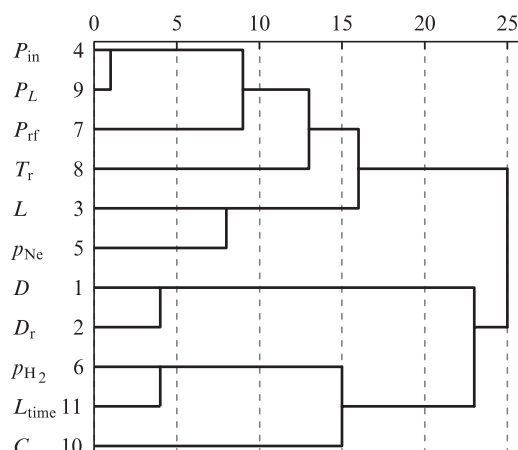


Рис.2. Дендрограмма кластеров из десяти независимых переменных и срок службы лазера  $L_{\text{time}}$ , полученные методом межгрупповых связей с метрикой квадрата евклидова расстояния. По горизонтали даны расстояния между кластерами в условной шкале от 0 до 25; 0 соответствует наименьшему расстоянию на первом этапе, а 25 – наибольшему расстоянию на последнем этапе.

переменными  $p_{H_2}$  и  $C$ . Можно ожидать, что эти величины сильнее влияют на времени жизни УФ Cu + Ne–CuBr-лазера.

#### 5. Классификация параметров методом факторного анализа

Факторный анализ является мощным средством исследования структуры взаимосвязей переменных и уменьшения размерности данного множества многомерных данных при условии минимальных потерь исходной информации. Метод применяется в случае коллинеарных или почти коллинеарных переменных, которые объединяются в группы (факторы) в зависимости от степени корреляции между ними. При этом сами факторы ортогональны друг другу или слабо коррелируют между собой. Такой подход позволяет уменьшить число исходных переменных и использовать полученные факторы в качестве искусственных переменных (вместо исходных) при дальнейшем анализе.

Подобно кластерному анализу, факторный анализ проводится в несколько этапов, описанных далее вместе с полученными результатами.

##### 5.1. Вычисление корреляционной матрицы

На первом этапе факторного анализа осуществляется стандартизация заданных значений переменных путем вычисления их  $z$ -значений (способ обезразмеривания) [4] и рассчитывается корреляционная матрица. Также устанавливаются условия наличия мультиколлинеарности и проводится проверка адекватности метода. Корреляционная матрица для всех десяти переменных и зависимой переменной  $L_{\text{time}}$  представлена в табл.1. Когда абсолютное значение некоторого коэффициента матрицы больше 0.5, считается, что соответствующие две переменные коррелируют, при этом чем коэффициент ближе к единице, тем больше эти две переменные коллинеарны между собой. Из результатов табл.1 видно, что существуют большие по модулю корреляционные коэффициенты. Поскольку детерминант матрицы (исключая  $L_{\text{time}}$ ) очень мал ( $6.27 \times 10^{-7}$ ), то имеется сильная мультикорреляция между переменными. Кроме того, в данном случае формальный ста-

Табл.1. Корреляционная матрица, содержащая парные корреляционные коэффициенты всех переменных УФ Cu + Ne–CuVr-лазера.

	$D$ (мм)	$D_r$ (мм)	$L$ (см)	$P_{in}$ (кВт)	$p_{Ne}$ (Тор)	$p_{H_2}$ (Тор)	$P_{rf}$ (кГц)	$T_r$ (°C)	$P_L$ (кВт/см)	$C$ (нФ)	$L_{time}$
$D$	1.000	0.789	-0.654	-0.465	-0.842	-0.164	-0.035	0.023	-0.312	-0.095	-0.166
$D_r$	0.789	1.000	-0.772	-0.363	-0.870	-0.171	-0.030	0.134	-0.135	-0.100	-0.174
$L$	-0.654	-0.772	1.000	0.485	0.593	0.040	0.055	-0.013	0.192	0.023	0.050
$P_{in}$	-0.465	-0.363	0.485	1.000	0.364	-0.169	0.533	0.257	0.951	-0.079	-0.181
$p_{Ne}$	-0.842	-0.870	0.593	0.364	1.000	0.054	0.122	0.042	0.209	0.031	0.057
$p_{H_2}$	-0.164	-0.171	0.040	-0.169	0.054	1.000	-0.395	-0.835	-0.202	0.452	0.783
$P_{rf}$	-0.035	-0.030	0.055	0.533	0.122	-0.395	1.000	0.440	0.576	-0.242	-0.389
$T_r$	0.023	0.134	-0.013	0.257	0.042	-0.835	0.440	1.000	0.298	-0.483	-0.848
$P_L$	-0.312	-0.135	0.192	0.951	0.209	-0.202	0.576	0.298	1.000	-0.095	-0.220
$C$	-0.095	-0.100	0.023	-0.079	0.031	0.452	-0.242	-0.483	-0.095	1.000	0.067
$L_{time}$	-0.166	-0.174	0.050	-0.181	0.057	0.783	-0.389	-0.848	-0.220	0.067	1.000

статистический критерий адекватности выборки Кайзера–Мейера–Олькина  $0.552 > 0.5$ , а коэффициент сферичности Бартлетта равен нулю. Это свидетельствует об адекватности факторного анализа [4].

Из корреляционной матрицы (табл.1) видно, что переменная  $L_{time}$  для времени жизни лазера сильно коррелирует только с  $p_{H_2}$  (0.783) и  $T_r$  (-0.848), причем вторая зависимость является обратно пропорциональной. Можно заключить, что увеличение давления водорода  $p_{H_2}$  ведет к увеличению  $L_{time}$ , тогда как рост температуры  $T_r$  резервуара медного бромида приводит к уменьшению  $L_{time}$ , и наоборот.

## 5.2. Извлечение факторов и выбор их количества

На втором этапе факторного анализа извлекаются факторы. Суть данной процедуры заключается в преобразовании коррелирующих исходных переменных в набор некоррелирующих переменных. Для этого обычно применяется метод главных компонент [4]. В нашем случае из матрицы данных для десяти независимых переменных этим методом рассчитываются десять направлений (компонентов), содержащих непересекающиеся доли общей дисперсии.

Особенность факторного анализа состоит в определении числа факторов из этих десяти компонентов. Сами факторы вычисляются путем преобразования матрицы всех данных в произведение двух матриц, одна из которых имеет меньшую вторую размерность, равную выбранному числу факторов, в пренебрежении некоторой матрицей ошибок. Из всех компонентов отобраны три фактора. Они определяют 80.27% суммарной дисперсии тестируемых данных. Из них первый фактор определяет 38.34% суммарной дисперсии, второй – 28.67% и третий – 13.26%.

## 5.3. Вращение факторов и вычисление факторных переменных

На следующем этапе осуществляется вращение факторов с целью создания упрощенной структуры и выделения факторов. При этом группирование переменных по факторам должно проводится таким образом, чтобы каждая переменная преобладала не более чем в одном факторе.

Обычно для ортогонального вращения применяют метод Varimax, а для косоугольного – Direct oblimin [4].

В целях классификации сначала используем метод Varimax для всех переменных – десяти исходных лазерных параметров и зависимой величины  $L_{time}$ . Процедура вра-

щения с тремя факторами дает матрицу повернутых (ротированных) компонентов, приведенную в табл.2, где коэффициенты (факторные нагрузки), меньшие по модулю 0.5, опущены.

Факторные нагрузки в табл.2 следует считать корреляционными коэффициентами между переменными и факторами. Так, переменные  $L_{time}$ ,  $T_r$ ,  $p_{H_2}$ ,  $C$  сильнее всего коррелируют со вторым фактором, причем величина корреляции для  $L_{time}$  составляет 0.837,  $T_r$  коррелирует с отрицательным знаком (-0.942),  $p_{H_2}$  имеет корреляцию 0.927 и  $C$  – 0.535. Как было отмечено выше, каждая переменная может преобладать только в одном факторе, а в других факторах она должна быть меньше определенного граничного значения (обычно 0.5 [4]). Если это не так, то необходимо выбрать другое число факторов или другой метод вращения. В нашем случае трехфакторное ротированное решение из табл.2 является вполне удовлетворительным. В результате получили следующие группировки по факторам:

$$\begin{aligned} F'_1 &= \{D_r, P_{Ne}, D, L\}, \\ F'_2 &= \{T_r, p_{H_2}, L_{time}, C\}, \\ F'_3 &= \{P_L, P_{in}, P_{rf}\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Три фактора (2) отражают 78.63% изменчивости всей выборки. Влияние отдельных факторов после вращения следующее: первый фактор определяет 35% суммарной дисперсии, второй – 31.12% и третий – 12.51%.

Табл.2. Матрица ротированных компонент, включая  $L_{time}$ .

Переменные	Факторы		
	$F'_1$	$F'_2$	$F'_3$
$D_r$	-0.946		
$p_{Ne}$	0.915		
$D$	-0.888		
$L$	0.823		
$T_r$		-0.942	
$p_{H_2}$		0.927	
$L_{time}$		0.837	
$C$		0.535	
$P_L$			0.959
$P_{in}$			0.899
$P_{rf}$			0.699

Примечание. Использовались два метода: метод извлечения – метод главных компонент и метод ротации – Varimax с нормализацией Кайзера.

Как отмечено выше, переменная  $L_{time}$  вместе с переменными  $T_r$ ,  $p_{H_2}$  и  $C$  группируется во втором факторе. Следовательно, между этими величинами существует высокая степень корреляции. Для  $T_r$  и  $p_{H_2}$  это находит подтверждение в соответствующем компоненте корреляционной матрицы (см. табл.1). На первый взгляд, величина  $C$  появляется во втором факторе неожиданно. Ее коэффициент с  $L_{time}$  в корреляционной матрице равен 0.067, и  $C$  не влияет непосредственно на  $L_{time}$ . По-видимому, влияние  $C$  имеет более сложный, нелинейный характер. Величина  $C$  может существенно влиять на  $L_{time}$  через ее взаимодействие с  $T_r$  и  $p_{H_2}$ . Это возможно, например, вследствие влияния новых нелинейных величин второй степени типа  $T_r, C$  и  $p_{H_2}, C$ . На данном этапе на этот вопрос ответить прямо нельзя, т.к. предлагаемый здесь статистический анализ линеен. Не рассматривается также возможное более сложное нелинейное влияние второй степени, которое можно исследовать, если каждая переменная из независимых величин может участвовать во взаимодействии с остальными не только в первой, но и во второй или в более высокой степени.

Поскольку нам понадобится найти зависимость  $L_{time}$  от десяти исходных лазерных величин, повторим опять описанную процедуру факторного анализа, опуская  $L_{time}$ . Используя метод Varimax, получим факторное решение

$$\begin{aligned} F_1 &= \{D_r, p_{Ne}, D, L\}, \\ F_2 &= \{P_L, P_{in}, P_{if}\}, \\ F_3 &= \{T_r, p_{H_2}, C\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Относительное влияние факторов (3) после вращения изменяется, а именно: первый фактор определяет 33.64% суммарной дисперсии, второй – 23.88% и третий – 22.75%. Суммарное влияние трех факторов равно 80.27%.

На последнем этапе факторного анализа рассчитываются значения факторов и получаются три новые (факторные) переменные  $F_1, F_2, F_3$  с размерностью  $n$ , которые могут использоваться для последующих статистических анализов.

## 6. Классификация лазерных параметров методом множественной регрессии

Множественный регрессионный анализ используется для построения моделей, количественно описывающих связи между несколькими независимыми переменными (регрессорами)  $x_1, x_2, \dots, x_p$  и одной или более зависимыми от них переменными  $y$ , где все переменные являются векторами с размерностью  $n$ . При условии нормального распределения  $y$  линейное регрессионное уравнение относительно коэффициентов регрессии имеет вид

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_px_{ip}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где  $y_i = \hat{y}_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n, b_0, b_1, \dots, b_p$  – коэффициенты регрессии;  $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$  – вектор ошибок.

Для выявления относительной роли каждой величины используется трансформация с помощью  $z$ -значений. При этом получается стандартизованное регрессионное уравнение вида

$$\hat{y} = \beta_1z_1 + \beta_2z_2 + \dots + \beta_pz_p. \quad (5)$$

Здесь  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_p$  – стандартизованные коэффициенты, показывающие относительное влияние каждой из незави-

симых величин на зависимую величину. Определение коэффициентов регрессии проводится хорошо известным методом наименьших квадратов, после чего исследуется их статистическая значимость [4].

Как уже было отмечено, основной задачей настоящей работы является определение степени влияния каждой из десяти независимых величин на зависимую величину  $L_{time}$ . Для этого нам потребуется методом регрессионного анализа найти стандартизованное уравнение типа (5).

### 6.1. Применение метода множественной регрессии главных компонент

Для получения коэффициентов регрессионных уравнений (4), (5) желательно, чтобы независимые величины в правых частях этих уравнений не коррелировали между собой. В частном случае они могут быть взаимно ортогональными. Последнее выполнено для факторных переменных  $F_1, F_2, F_3$  из (3), полученных методом вращения Varimax, что позволяет найти стандартизованное уравнение вида

$$\hat{L}_{time} = \beta_1F_1 + \beta_2F_2 + \beta_3F_3. \quad (6)$$

После проведения регрессионного анализа с факторами  $F_1, F_2, F_3$  получаем оценки, приведенные в табл.3. Используя стандартизованные коэффициенты  $\beta_{1,2,3}$ , записываем искомое уравнение:

$$\hat{L}_{time} = 0.131F_1 - 0.245F_2 + 0.651F_3. \quad (7)$$

Видно, что наибольший коэффициент ( $\beta_3 = 0.651$ ) имеет  $F_3$ , группирующий переменные  $T_r, p_{H_2}$  и  $C$ . Таким образом, эти переменные оказывают наибольшее влияние на величину  $L_{time}$ . Полученные из регрессионного уравнения (7) результаты подтверждают данные факторного анализа (см. табл.2).

## 7. Результаты статистических анализов и их физическая интерпретация

Для определения степени влияния десяти независимых величин на время жизни УФ Cu + Ne–Cu-лазера в работе использовались три статистических метода – кластерный, факторный и регрессионный анализы. Каждый из методов дает специфический ответ на рассматриваемый вопрос. Цель данного раздела – обобщить полученные результаты и истолковать их физический смысл.

Основой классификации входных параметров по степени влияния на срок службы лазера является их группирование с помощью факторного анализа по критерию корреляции. В результате было установлено, что срок служ-

Табл.3. Коэффициенты регрессии с факторами  $F_{1,2,3}$  в модели линейной регрессии ( $L_{time}$  – зависимая переменная).

Нестандартизованные коэффициенты		Стандартизованные коэффициенты	Значимость
$b_i$	Стандартная ошибка	$\beta_i$	
118.655	10.538	–	0.000
30.056	10.560	0.131	0.005
–56.014	10.560	–0.245	0.000
148.789	10.560	0.651	0.000

бы лазера главным образом определяют следующие три величины:  $T_r$ ,  $p_{H_2}$  и  $C$ . Это подтверждают и результаты регрессионного анализа. Кластерный анализ также частично подтверждает полученный результат, поскольку в третий кластер уравнения (1) вместе с  $L_{time}$  входят  $p_{H_2}$  и  $C$ .

Влияние величины  $T_r$  на срок службы лазера – хорошо известный факт, и это влияние отрицательно. Увеличение температуры резервуара бромида меди ведет к росту концентрации молекул галогенида меди и к повышению выходной лазерной мощности, что в свою очередь увеличивает потери активного вещества. Последнее может произойти путем распыления вещества, заполнения им холодных частей лазерной трубки, а также накопления в окрестностях выходных зеркал, где температура самая низкая. Повышение температуры всегда приводит к термохимической деградации вещества, и оно становится неспособным к дальнейшему участию в лазерной генерации. Поскольку лазерная трубка отпаяна и убыль вещества компенсировать нельзя, то с течением времени происходит уменьшение мощности.

Влияние эквивалентной ёмкости  $C$  конденсаторной батареи имеет более сложный и неоднозначный характер. Из полученных результатов видно, что срок службы лазера  $L_{time}$  прямо пропорционален этой величине. Полученный результат является дискуссионным. С увеличением ёмкости  $C$  увеличиваются накопленная в конденсаторной батарее энергия, а также постоянная времени её разрядки. Выделение накопленной энергии в течение очень короткого периода подвергает лазерную трубку серьезным физическим деформациям, что приводит к ее повреждению. Электроды распыляются и тем самым засоряют активную лазерную среду. Результаты анализа показывают, что увеличение времени разрядки конденсаторной батареи может иметь положительное влияние на долговечность трубки. Мы считаем эти результаты предварительными. Более точную оценку влияния эквивалентной ёмкости  $C$  конденсаторной батареи можно получить после нелинейного анализа взаимодействия этой величины с другими, например с  $T_r$  и  $p_{H_2}$ , с которыми она коррелирует (см. табл.1).

Следует отметить положительное влияние увеличения давления добавочного газа водорода  $p_{H_2}$ . Как известно, с ростом  $p_{H_2}$  увеличивается выходная мощность лазерной генерации. Однако оказывается, что при увеличении  $p_{H_2}$

растет и срок службы лазера. Этот факт является несколько неожиданным. Как хорошо известно, в качестве электроотрицательного газа водород увеличивает потери электронов в разряде, что приводит к изменению вольт-амперной характеристики разряда. При одной и той же подводимой электрической мощности растет напряжение между электродами и убывает ток через трубку. Уменьшение разрядного тока всегда благоприятствует увеличению срока службы лазерной трубки. Электроды распыляются медленнее, вероятность развития термоионизационной и электроионизационной неустойчивости уменьшается. Замедляются процессы деградации лазерной среды. Комплекс этих условий в некоторой степени увеличивает среднее время использования лазерной трубки. Таким образом, можно рекомендовать добавление водорода для обеспечения более длительного срока службы лазерной трубки.

## 8. Заключение

В настоящей работе впервые предложен явный параметрический метод оценки степени влияния десяти независимых величин на срок службы УФ Cu + Ne–CuBr-лазера. С помощью нескольких статистических методов (кластерный, факторный и регрессионный анализы) установлено, что из всех этих величин только три имеют существенное влияние на срок службы лазера. Проведен физический анализ и осуществлена интерпретация полученных результатов.

Предложенный подход может быть распространен и на исследования других типов лазеров.

1. Vuchkov N.K., Temelkov K.A., Zahariev P.V., Sabotinov N.V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **35** (12), 1799 (1999).
2. Vuchkov N.K., Temelkov K.A., Zahariev P.V., Sabotinov N.V. *Opt. Laser Techn.*, **36** (1), 19 (2004).
3. Vuchkov N.K., Temelkov K.A., Sabotinov N.V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **41** (1), 62 (2005).
4. Наследов А.Д. *SPSS 19: Профессиональный статистический анализ данных* (М.: Питер, 2011).
5. Vuchkov N.K., Temelkov K.A., Zahariev P.V., Sabotinov N.V. *Laser tube for ultraviolet copper laser*. Bulgaria Patent No.64880, 03.08.2006.
6. Vuchkov N., in *New Development in Lasers and Electric-Optics Research* (New York: Nova Sci. Publ., 2007, p. 41).