

Оптимизация конструкции металлогалогенной лампы в целях улучшения качества цветопередачи и постоянства цвета*

З. КРАСКО, Н. БРАТЕС, Э. НОРТРУП**

OSRAM SYLVANIA INC.

Введение

Металлогалогенные лампы средней и большой мощности (от 175 до 1500 Вт) появились в США в начале 60-х годов. Они имели высокую световую отдачу, световую температуру $T_{ц} \approx 4000$ К и общий индекс цветопередачи $R_a = 65$, т.е. параметры, удовлетворяющие требованиям большинства ОУ. Эти лампы обычно имели наполнение в виде иодидов натрия, скандия (с возможным добавлением также иодида цезия)*** и относительно малую удельную мощность 12 Вт/см², отнесенную к внутренней поверхности разрядной трубы.

С учетом потребности рынка в мало-мощных лампах была разработана и выпущена серия мало-мощных МГЛ (50, 70, 100 и 150 Вт) тепло-белого цвета с $T_{ц} \approx 3000$ К и улучшенным качеством цветопередачи ($R_a = 75$). Это было достигнуто путем добавления к натрий-скандиевым иодидам иодида лития [1]. Однако лампы с добавкой LiI имели пурпурный оттенок излучения, который характеризовался смещением координат цветности, соответствующих черному телу при $T = 3200$ К ($x = 0,420$, $y = 0,395$), вниз к значениям $x = 0,420$, $y = 0,380$. Поэтому смещение цветности было признано нежелательным. Кроме того, специальный индекс цветопередачи (глубокий красный) имел низкое отрицательное значение — 65. Вдобавок, эти лампы имели значительный разброс цветовой температуры, зависящий от положения горения, и нестабильность $T_{ц}$ при переходе от лампы к лампе.

Недавно была выпущена новая серия компактных МГЛ с керамической разрядной трубкой, наполненной иодидами натрия-таллия-диспрозия. Разрядная трубка из поликристаллического оксида алюминия выдерживает более высокие рабочие температуры, что приводит к более высокой световой отдаче, лучшему качеству цветопередачи и меньшему разбросу и изменению цвета [2].

Целью настоящей работы было исследование возможностей кварцевого стекла как материала разрядной трубы для дальнейшего повышения качества цветопередачи и стабильности цвета от лампы к лампе, а также уменьшения зависимости цветовых характеристик от положения горения.

1. Эффект повышения нагрузки на стенку

Оптимальной удельной нагрузкой обычной 100-ваттной МГЛ с наполнением иодидами натрия-скандия-лития для получения высокой световой отдачи 85 лм/Вт, $T_{ц} = 3000$ К, $R_a = 75$ и среднего срока службы 15 000 ч при вертикальном положении горения была принята нагрузка 15 Вт/см². При более высокой удельной нагрузке на стенку световая отдача и качество цветопередачи слегка повышаются, но цветовая температура становится слишком низкой, а срок службы падает из-за чрезмерно высокой температуры стенок.

Улучшение цветовых характеристик новой лампы было достигнуто путем модификации состава металлогалогенного наполнения, которое состояло из иодидов натрия, скандия, лития, диспрозия и таллия [3]. При новом наполнении и повышении при этом удельной нагрузки на

стенку (до 21 Вт/см²) качество цветопередачи улучшалось, и в то же время не было обнаружено вредного действия от повышения удельной нагрузки. Это объясняется более равномерным распределением температуры по стенке разрядной трубы с существенно более высокой температурой внизу (в зоне конденсации иодидов) и максимальной температурой вверху разрядной трубы, не превышающей 900 °C (табл. 1).

В табл. 2 приведены для сравнения характеристики 100-ваттных ламп, наполненных смесью иодидов натрия-скандия-лития (трехкомпонентная), и ламп, наполненных новой пятикомпонентной смесью.

Пятикомпонентная система приводит к улучшению качества цветопередачи — общего индекса цветопередачи R_a на 10, а специального глубокого красного $R_{(9)}$ — на 50 единиц. На рис. 1 приведены для сравнения спектры трехкомпонентной и пятикомпонентной смесей. Отчетливо видно увеличение излучения по всему видимому спектру, но особенно в его красной части.

План эксперимента для оптимизации начальных характеристик

Как видно из рис. 1, добавление иодидов двух металлов (диспрозия и таллия) к базовой химической смеси и работа при повышенной удельной нагрузке изменяют выход излучения лампы. При этом химический состав смеси должен быть оптимизирован в молярном соотношении так, чтобы общий индекс цветопередачи существенно возрос, но без заметного изменения световой отдачи и цветовой температуры.

Оптимизация химического состава наполнения была выполнена путем широкого использования метода планирования эксперимента с минимальным числом

Таблица 1

Влияние состава наполнения и удельной нагрузки на стенку на температуру стенок разрядной трубы

Состав наполнения	Удельная нагрузка, Вт/см ²	Температура, °C		ΔT , °C
		вверху	внизу	
Трехкомпонентный	15,5	865	810	55
Трехкомпонентный	21,0	910	900	10
Пятикомпонентный	21,0	895	890	5

Таблица 2

Влияние состава наполнения и удельной нагрузки на стенку на характеристики ламп

Состав наполнения	Удельная нагрузка на стенку, Вт/см ²	Световая отдача, лм/Вт	$T_{ц}$, К	R_a	Специальный индекс цветопередачи, $R_{(9)}$
Трехкомпонентный	15,5	85	3000	75	- 65
Трехкомпонентный	21,0	73	2680	79	- 26
Пятикомпонентный	21,0	85	3000	85	- 15

* Доклад на конференции Светотехнического общества Северной Америки, 1997 г., г. Сиэтл. Перевод с англ. проф. Г.Н. Рохлина.

** OSRAM SYLVANIA INC. 71 Cherry Hill drive Beverly, MA, 01915, USA. OSRAM SYLVANIA INC. 655 South Willow St., Manchester, NH 03103, USA.

*** Этот состав наполнения характерен для ламп фирмы Sylvania (США) [Прим. пер.]

лом итераций (повторений). Эксперименты проводили с лампами, химический состав смесей которых соответствовал указанным ниже:

Факторы эксперимента и пределы их изменений

Факторы эксперимента	Пределы их изменения
Молярное отношение Na:Sc	От 24:1 до 49:1
Содержание DyI ₃ (миллимоль/см ³)	От 2,3 до 4,7
Молярное отношение DyI ₃ :(NaI-ScI ₃ -LiI)	От 0,047 до 0,094
Содержание TlI (миллимоль/см ³)	От 0,3 до 1,4
Общая масса наполнения, мг/см ³	От 5,5 до 12

Вариации химического состава наполнения достигались дозировкой в лампы различных количеств солей NaI:ScI₃:LiI (трехкомпонентная смесь) и DyI₃ и TlI (для достижения соответствующего молярного соотношения) или синтезом смеси NaI:ScI₃:LiI:DyI₃:TlI (пятикомпонентная смесь) с различными молярными соотношениями Na:Sc и различным процентным содержанием TlI по массе.

Для уменьшения числа экспериментов с различными комбинациями химического состава наполнения был применен план эксперимента (ПЭ), учитывающий кроме прямого воздействия факторов (вводимых переменных) и их частичное взаимодействие.

После каждой итерации результаты анализировались на ЭВМ по принятому ПЭ. При этом для оптимизации химического состава наполнения лампы и оценки разброса широко применялся графический метод нанесения точек "отклика" на диаграмму.

Результаты эксперимента (или "отклики") оценивались при помощи многомерного регрессионного уравнения. По существу модель взаимодействий

может быть описана следующей формулой:

$$Y = a_0 + \sum_i b_i X_i + \sum_{i,j,k} c_{i,j,k} X_i X_j X_k \dots ,$$

где $a, b, c \dots$ — коэффициенты регрессии; Y — отклики (световая отдача, T_u ; R_a ; $x; y; R_{(9)}$ и т.д.); $X_i X_j X_k \dots$ — факторы (или прогнозируемые) такие, как молярное соотношение Na:Sc, молярная концентрация TlI; общее количество вводимой химической смеси и т.п.

Результаты экспериментов представлены на следующих рисунках. Рис. 2 иллюстрирует прогнозируемый "отклик" — световую отдачу — в зависимости от молярного отношения Na:Sc и DyI₃:(NaI-ScI₃-LiI). Сплошные кривые соответствуют линиям равных световых отдач в плоскости, имеющей следующие координаты: молярное отношение Na:Sc и молярное отношение DyI₃:(три компоненты). Из рисунка видно, что для того чтобы достичь наивысшей световой отдачи, химический состав смеси должен иметь высокое молярное отношение Na:Sc, скажем 50, и минимальное отношение DyI₃ к "трехкомпонентной" смеси. Однако "отклик" — общий индекс цветопередачи (рис. 3) — показывает, что для увеличения R_a состав наполнения должен иметь большое значение молярного отношения DyI₃ к "трехкомпонентной" смеси. На рис. 4 представлены значения прогнозируемой цветовой температуры в зависимости от химического состава смеси.

Этот эксперимент является классическим примером одновременной оптимизации параметров с различными требованиями к отдельным переменным, например две величины — световая отдача и R_a — должны быть максимизированы (т.е. чем больше, тем лучше), но при этом координаты цветности (а также T_u) должны оставаться внутри определенного интервала [$T_u = (3000 \pm 200)$ K; $0,380 < y < 0,400$]. С учетом полученных результатов окончательно был выбран химический состав наполнения для новых МГЛ с высоким значением R_a .

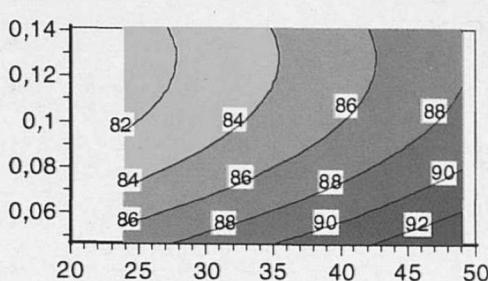


Рис. 2. Диаграмма значений световой отдачи, лм/Вт, при различных молярных отношениях Na:Sc и DyI₃: (трехкомпонентная смесь)

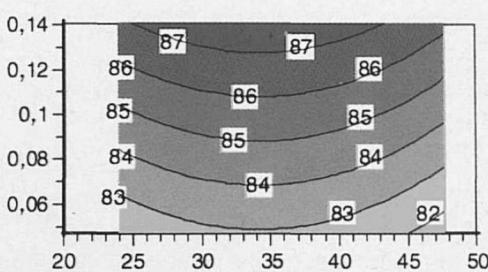


Рис. 3. Диаграмма значений R_a при различных молярных отношениях Na:Sc и DyI₃: (трехкомпонентная смесь)

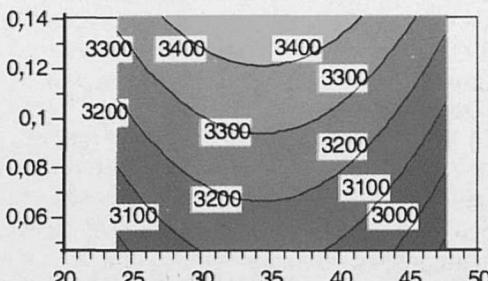


Рис. 4. Диаграмма значений T_u при различных молярных отношениях Na:Sc и DyI₃: (трехкомпонентная смесь)

Любое положение горения оптимизированной лампы

Равномерное распределение температуры по поверхности разрядной трубки обеспечивает работу лампы в любом положении горения. Данные табл. 3 показывают существенное уменьшение разницы в цветовой температуре при вертикальном и горизонтальном положениях горения для двух групп ламп: обычных ламп с трехкомпонентным наполнением и ламп новой конструкции с пятикомпонентным наполнением (рис. 5). Световая отдача ламп новой конструкции не меняется (только незначительно уменьшается R_a).

Другим важным преимуществом ламп новой конструкции является существенное уменьшение разброса цветовой температуры от лампы к лампе.

Результаты испытаний на срок службы

После фотометрических измерений после 100 ч горения внимание было сосредоточено на влиянии наиболее высоких температур и химического состава наполнения на срок службы лампы.

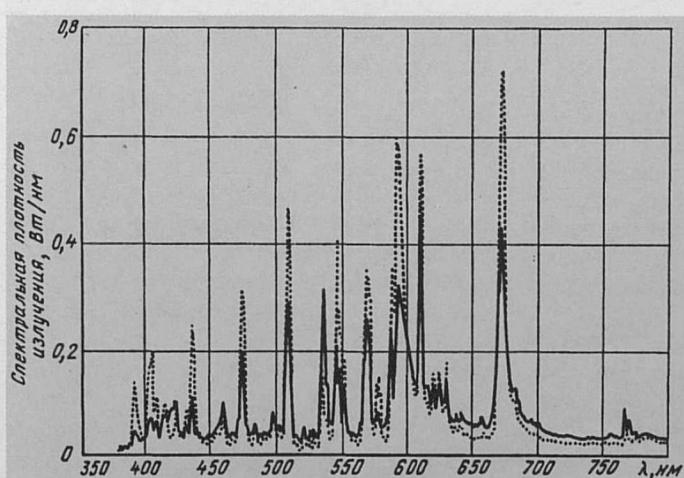
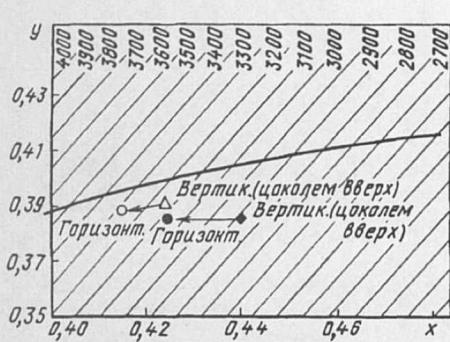


Рис. 1.
Спектральное
распределение
мощности ламп
стандартной
конструкции (.....)
с $R_a = 75$
(трехкомпонентная
смесь) и новой
разработки (—)
с $R_a = 85$
(пятикомпонентная
смесь)

Таблица 3

Рис. 5. Смещение координат цветности (x, y) при изменении положения горения лампы:

— изолинии $T_{\text{ц}}$; — локус АЧТ; $\blacklozenge \bullet$ — трехкомпонентная смесь; $\Delta \square$ — пятикомпонентная смесь

Главной целью было выяснение поведения кварца в зоне между конденсатором и стенкой разрядной трубы. (Самые высокие температуры разрядной трубы не настолько высоки, чтобы беспокоиться о размягчении кварца в течении срока службы при работе лампы в горизонтальном положении). Обычно часть поверхности кварца в процессе горения начинала кристаллизоваться, что со временем в большинстве случаев приводило к натеканию горелки. Именно это было главной причиной разрушения и окончания срока службы. Поэтому для получения достаточного срока службы лампы необходимо контролировать степень разрушающего взаимодействия.

Испытания с новым химическим наполнением при высоких температурах стенки были аналогичны таким же испытаниям на маломощных МГЛ обычной конструкции с $R_a = 75$. К концу своего срока службы разрядные трубы начинали кристаллизоваться и обычно это приводило к натеканию. Зона кристаллизации, как правило, располагалась под местом конденсата в разрядной трубке. Это явление развивалось только в тех случаях, когда лужица конденсата соприкасалась с кварцевой стенкой, имеющей достаточно высокую температуру.

Степень разрушения зависит от нескольких причин: во-первых, от агрессивности химического состава наполнения, во-вторых, от степени загрязнения наполнения и, в-третьих, от температуры кварцевой стенки. Стандартное наполнение ($R_a = 75$), состоящее из смеси иодидов натрия, скандия и лития, обеспечивает срок службы 15 000 ч, если наивысшая температура стенки под лужицей конденсата составляет около 820 °C. В том случае, когда эта температура поднимается до 860 °C, срок службы разрядной трубы падает вдвое, т.е. приблизительно до 7500 ч.

Как было сказано ранее, температура разрядной трубы новой конструкции была существенно выше, чем это было приемлемо, а именно около 920 °C. Од-

Влияние положения горения лампы на цветовую температуру

Положение горения	$T_{\text{ц}} \pm \sigma$ обычных ламп, К ($n_{\text{л}} = 12$ шт)	$T_{\text{ц}} \pm \sigma$ ламп с новым наполнением, К ($n_{\text{л}} = 14$ шт)
Вертикальное	2930 ± 180	3115 ± 125
Горизонтальное	3420 ± 210	3215 ± 140
	$\Delta T_{\text{ц}} = 490$	$\Delta T_{\text{ц}} = 100$

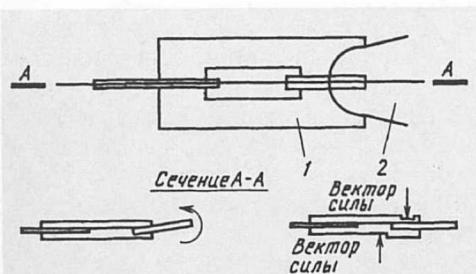
Таблица 4

Влияние конструкции пресс-формы на угол отклонения стержня электрода

Тип разрядной трубы	Угол отклонения
Плоская пресс-форма (рис. 6, а)	$4,5^\circ$
Плоская пресс-форма (рис. 6, а)	$3,7^\circ$
Новая конструкция (рис. 6, б)	$0,9^\circ$
Новая конструкция (рис. 6, б)	$0,5^\circ$

нако значительное уменьшение срока службы имело бы место только в том случае, если бы степень агрессивности и загрязнения наполнения оставались теми же самыми, что и в предыдущей конструкции лампы. Как показали результаты испытаний, новый состав наполнения оказался химически менее агрессивным, а уровень загрязнения влагой был снижен настолько, что этот тип лампы имел приемлемый срок службы 7500 ч и более.

Одним из главных достоинств конструкции новой лампы было выравнивание температуры по поверхности разрядной трубы — снижение наиболее высо-

Рис. 6. Процедура центровки электрода:
1 — сечение прессованного впая; 2 — околосеребряная полость разрядной трубы

кой температуры и повышение температуры холодной зоны, что улучшило светотехнические параметры и в то же время увеличило срок службы. Это значит, что контроль за геометрическими параметрами разрядной трубы и положением электродов является очень важным.

И самое главное при производстве — обеспечивать оптимальные формы приэлектродных частей разрядной трубы и положение электродов по отношению к месту впая. Проблемой, присущей операции заштамповки тонкой, легко гнувшейся молибденовой фольги, является отклонение электродов под действием силы тяжести к нижней стенке разрядной трубы. Оно возникает вследствие того, что электрод не центрирован между двумя кварцевыми стенками, в то время как фольга центрирована. В результате во время заштамповки фольги в размягченный кварц электрод постоянно смещается вниз.

Это приводит к образованию горячей точки с одной стороны и более холодной — с другой стороны в приэлектродных областях разрядной трубы.

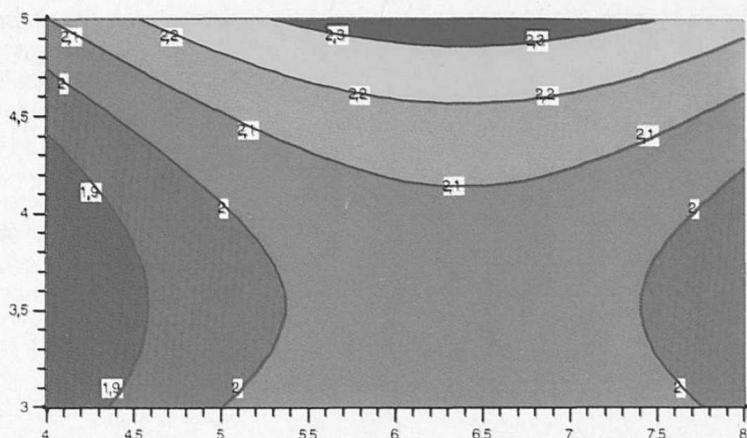
На перегретой стороне раньше начинается кристаллизация.

Поскольку это нежелательное явление довольно часто повторялось от трубы к трубке, для выхода из положения в штампе был сделан выступ, уменьшающий силу, действующую на электрод и заставляющую его наклоняться вниз в свободном пространстве. Эта первая попытка позволила выпрямить положение электрода, но недостаточно. Для полного выпрямления был добавлен второй выступ с другой стороны штампа, толкающий электрод в нужное положение. Эта балансировка сил вокруг электрода во время операции заштамповки ввода позволила существенно выпрямить положение электрода. На рис. 6 дана конструкция штампов, а в табл. 4 приведены соответствующие углы отклонения электрода.

С этой новой конструкцией разрядной трубы температуры стенок в приэлектродных областях стали постоянными с той и другой стороны. А в старой конструкции (плоский штамп) разница в температуре превышала 100 °C. С усовершенствованной конструкцией штампа разница стала меньше 20 °C, что лежит в пределах погрешности измерения.

Второй проблемой, рассмотренной в процессе разработки новой лампы, было уменьшение содержания влаги (являющейся главным загрязнением) в разрядной трубке. В технологический процесс были введены некоторые дополнительные операции, которые уменьшили содержание влаги. Все эти усовершенствования затем были включены в технологический процесс производства разрядной трубы.

Рис. 7.
Диаграмма
предсказуемой
степени
кристаллизации
кварца



При оптимальной комбинации химического состава и дозы наполнения, а также при новой геометрии разрядной трубы были достигнуты: $T_{\text{ц}} = 3100 \text{ K}$, $R_a = 85$ и световая отдача 85 лм/Вт. Оставался неясным вопрос, как эти изменения повлияют на скорость кристаллизации кварца. Ясно, что увеличение высоты отражающего покрытия концов труб-

ки повышало температуру концов, а возросшая доза испарившейся добавки увеличивала поверхность соприкосновения конденсата с кварцем соответственно росту температуры заэлектродных частей разрядной трубы. Для выяснения влияния этих эффектов в процессе горения был разработан и начат эксперимент, продолжавшийся в течение нескольких тысяч часов.

Эксперимент проводился по полностью пересекающейся схеме с двумя независимыми переменными на трех уровнях. В качестве независимых переменных были взяты высота утепляющего покрытия разрядной трубы и масса химической добавки. После 2000 ч горения кристаллизация разрядной трубы была оценена по шкале от 1 до 3. Единице (1) соответствовала очень слабая кристаллизация, а трем (3) — кристаллизация, соответствующая примерно данной продолжительности горения. Наблюдения были проанализированы на ЭВМ при помощи программы эксперимента и показаны на рис. 7, из которого видно, что степень кристаллизации резко зависит от высоты отражающего покрытия, в то время как количество введенной добавки оказывает очень слабое влияние.

Оценить реакцию стенки можно также по росту напряжения на лампе в процессе горения. Результат эксперимента, представленный ниже, показал резкий рост напряжения в группе ламп с наибольшей высотой покрытия и приемлемый — в группах ламп с меньшей высотой покрытия. В группе с наибольшей высотой покрытия температура холодной точки достигала критического значения, при котором скорость кристаллизации возрастала до неприемлемой степени.

Конструкция новой лампы может быть сравнена с обычной конструкцией лампы, имеющей $R_a = 75$ и срок службы 15 000 ч. Для более полного представления об изменении фотометрических величин в процессе горения даны графики изменения светового потока, напряжения на лампе, $T_{\text{ц}}$ и R_a (рис. 8–10). Пунктирные кривые для ламп новой конструкции с отношением Na:Sc равным 24:1 добавлены к рисунку, поскольку эта группа ламп была изготовлена

раньше и по ней было больше данных. Единственным отличием этой группы была $T_{\text{ц}}$, равная приблизительно 3500 К, а изменения в процессе горения были такими же, как и у новой группы ламп с более высоким молярным отношением Na:Sc (рис. 8–10). Погрешности измерений для каждой точки представлены стандартно в виде вертикальных отрезков, размер которых характеризует разброс измерений.

Заключение

Новый химический состав металлогалогенной добавки и оптимизация конструкции разрядной трубы привели к значительному улучшению МГЛ мощностью 100 Вт как в отношении качества цветопередачи, так и однородности и стабильности цвета, в том числе и при работе лампы в различных положениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Keeffe. W.M., Krasko Z.K. Improved Low Wattage Metal Halide Lamp / J. of the IES. Vol. 19. № 1. 1988. P.39.
2. Carleton S., Seinen P., Stoffels J. Metal Halide lamps with Ceramic Envelopes. 1996 IES Conference. Paper № 15.
3. Krasko Z., Brates M. Metal Halide Lamp with Improved Color Characteristics. Patent pending.
4. Nortrup E., Provost P., Bazin S. Arc Tube with Straightend Electrodes. Patent pending.

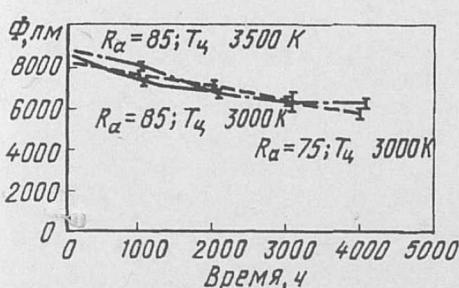


Рис. 8. Изменение светового потока в процессе горения

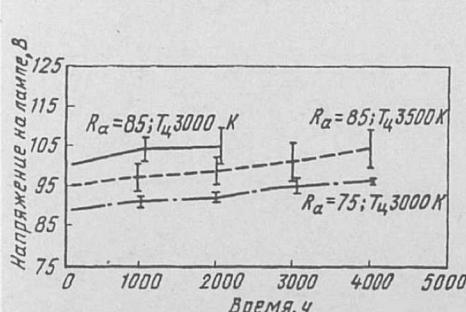


Рис. 9. Изменение напряжения на лампе в процессе горения

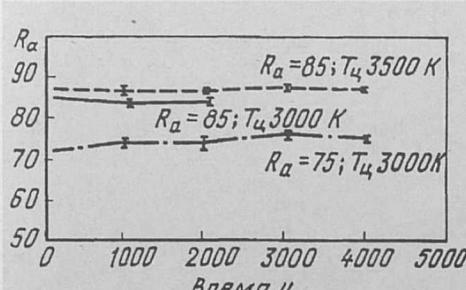


Рис. 10. Изменение R_a в процессе горения ламп



Зея Краско
(Zeya Krasko),
доктор наук,
окончила МЭИ,
защитила докторскую
диссертацию
в ВНИСИ, в 1981 г.
работает в фирме
Sylvania, ведущий
специалист в области
МГЛ



Нану Братес
(Nanu Brates),
доктор наук, окончил
политехнический
институт в Бухаресте
в 1976 г., защитил
докторскую
диссертацию
в университете в
Нью-Йорке (Буффало)
в 1983 г. С 1983 г.
работает в фирме
Sylvania



Эдвард Нортроп
(Edward H. Nortrup)
окончил
Северо-Восточный
университет США
в 1987 г. и получил
степень магистра
в Массачусетском
университете в 1993 г.
Работает в фирме
Sylvania с 1993 г.