

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НАПОЛНЕНИЯ МОЩНЫХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Инж. И. М. ВЕСЕЛЬНИЦКИЙ

Всесоюзный светотехнический институт

Расчеты, проведенные нами [Л. 1], показали, что энергетический к. п. д.¹ разряда в мощных люминесцентных лампах должен повышаться при снижении давления наполняющего газа до определенной величины, при которой η_e достигает максимального значения. В частности, для ртутно-argonового разряда с удельной нагрузкой 1,5 вт/см величина p , соответствующая максимуму η_e , должна быть порядка 0,1 мм рт. ст. Косвенное экспериментальное подтверждение этих выводов следует из сопоставления данных о зависимости интенсивности резонансного излучения от тока, полученных Ф. А. Бутаевой и В. А. Фабрикантом для разряда в парах чистой ртути [Л. 2], и той же зависимости для разряда в реальных лампах, наполненных аргоном до $p=3-4$ мм рт. ст. при оптимальном давлении паров ртути [Л. 3]. Так как в первом случае зависимость имеет строго линейный характер, а во втором достаточно резко насыщающийся, это позволяет предполагать, что внутри указанного диапазона постепенное снижение p приводит к тому, что зависимость $I=f(i)$ должна становиться все более прямолинейной. Из этого следует, что при каком-то более низком, чем в стандартных лампах, давлении наполняющего газа постоянство η_e должно выполняться для достаточно широкого диапазона мощностей.

Результаты экспериментов. Целью работы было получение в максимально возможном объеме сведений о зависимости интенсивности резонансного излучения от тока и мощности разряда при самых различных параметрах газового разряда и определение оптимальных условий наполнения для ламп различной мощности. Для этого интересующие зависимости были изучены на лампах, различающихся диаметром, родом и давлением наполняющего газа. Измерения проводились на неотпаянных кварцевых лампах диаметром 17, 25, 38 и 54 мм, помещенных

в водянную баню. Были сняты электрические и оптические характеристики разрядов в зависимости от тока и мощности при давлении ртути $6,3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. (температура холодной зоны 40°C) с инертными газами Хе, Kr, Ar, Ne и He, а также с некоторыми их смесями. Давление инертного газа изменялось в пределах от 4 до $5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. Во всех случаях измерялась (в относительных единицах) зависимость интенсивности резонансных линий ртути $\lambda=185$ нм и $\lambda=254$ нм от тока (до 5 а) и удельной мощности. Наиболее интересные результаты сравнивались с данными, полученными на отпаянных лампах с люминофором. Перевод относительных значений интенсивности, полученных в настоящей работе, в абсолютные произведен по данным измерений абсолютных значений интенсивности для обеих линий, выполненных Бернсом [Л. 3]. В качестве опорных точек использованы значения интенсивности линий в ртутно-аргоновом разряде при $i=1$ а и $p=2$ мм рт. ст. в трубке диаметром 38 мм.

Ниже приводятся некоторые наиболее интересные результаты измерений, касающиеся в основном разрядов в трубке диаметром 38 мм, позволяющие судить об основных закономерностях, связывающих выход излучения с параметрами разряда.

На рис. 1 представлены измеренные зависимости $I=f(P_{уд})$ для Ar и Ne в трубке диаметром 38 м.И. Из рисунка видно, что по мере снижения p рост I с увеличением мощности разряда становится все более линейным. Ход зависимостей $I=f(P_{уд})$ для Kr и Xe аналогичен приведенным кривым. Чем тяжелее газ, тем более четко выражен переход от насыщающейся зависимости к линейной.

Зависимость диапазона мощностей, в котором имеет место линейный рост интенсивности излучения с $\lambda=254$ нм (диапазон линейности), от давления наполняющего газа дан на рис. 2. При построении зависимости было условно принято, что значения I лежат в диапазоне линейности, если для всех значений интенсивности данного участка кривой $I_{254}=[f(P_{уд})]_o^x$ выполняется соотношение $I_{254}(P_{уд})_x/(P_{уд})_x \approx \text{const}$. Из этих кривых видно, что при низком давлении таких наполняющих газов, как Ar и Kr, постоянство η_e соблю-

¹ В статье принятые следующие обозначения: η_e — энергетический к. п. д. разряда; p — давление наполняющего газа; $P_{уд}$ — удельная нагрузка; i — ток разряда; n_e — концентрация электронов; n_e/i — удельная концентрация электронов; T_e — электронная температура; I , I_{254} , I_{185} — интенсивности резонансного излучения; λ_e — длина свободного пробега электрона; m_e — масса атома наполняющего газа.

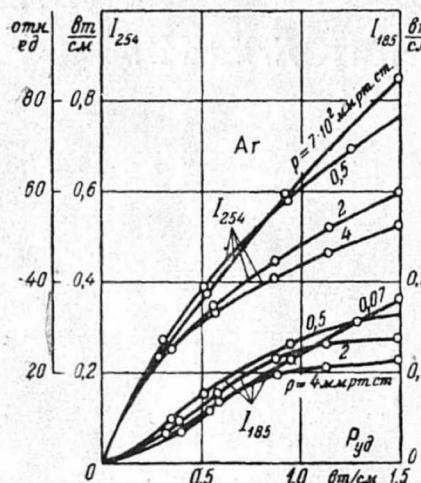


Рис. 1. Интенсивность излучения резонансных линий в ртутно-аргоновом и ртутно-неоновом разрядах в зависимости от удельной мощности для различных давлений газа.

Диаметр трубы 38 мм; \$T_{\text{конд.ртути}} = 40^\circ \text{C}\$ (то же на рис. 2, 3, 4, 7 и 8).

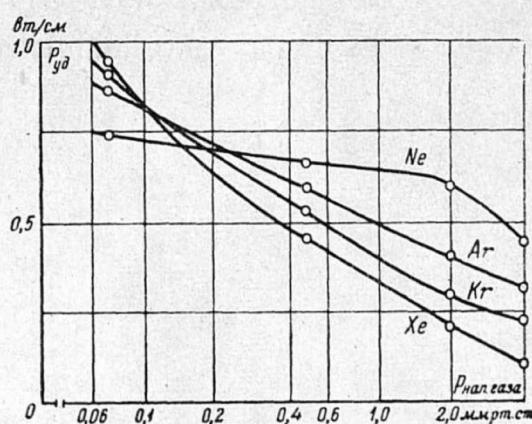
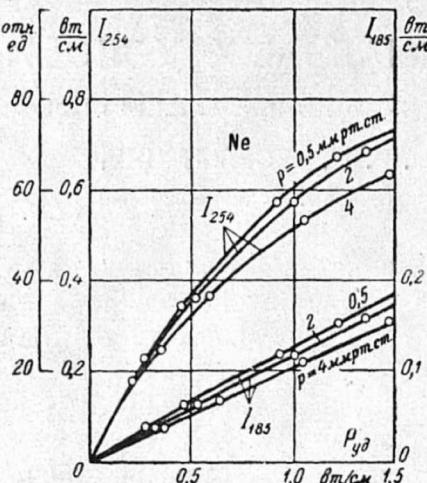


Рис. 2. Зависимость диапазона линейного увеличения лучистого потока \$\lambda = 254 \text{ нм}\$ от давления наполняющего газа.

дается вплоть до значений \$P_{ud}\$ порядка 1 \$W/cm\$. Наиболее резкое увеличение диапазона линейности (десятикратное) имеет место в ртутно-ксеноновом разряде; для ртутно-неонового разряда снижение давления ниже 1 \$mm \text{ rt. st.}\$ практически не оказывает влияния на линейную часть характеристики \$I_{254} = f(P_{ud})\$. Аналогичные зависимости для линии \$\lambda = 185 \text{ nm}\$ выражены менее отчетливо.

Рисунок 3 иллюстрирует зависимость \$\eta_{254}\$ от давления аргона для трех различных удельных мощностей. Для каждой мощности имеется свой диапазон давлений, в котором величина \$\eta\$ максимальна: 0,1–2,0 \$mm \text{ rt. st.}\$ для \$P_{ud} = 0,33 \text{ W/cm}\$; 0,05–0,50 \$mm \text{ rt. st.}\$ для \$P_{ud} = 0,75 \text{ W/cm}\$ и 0,01–0,10 \$mm \text{ rt. st.}\$ для \$P_{ud} = 1,5 \text{ W/cm}\$. По мере увеличения мощности диапазон оптимальных давлений сдвигается в область низких давлений. Аналогичные зависимости имеют место и для других наполняющих газов. Данные о суммарном, по двум резонансным линиям, абсолютном энергетическом выходе положительного столба представлены

на рис. 4. Кривая для каждого из обследованных газов соответствует характеристикам разряда при том давлении наполняющего газа, при котором наблюдались максимальные значения \$\eta_\vartheta\$ для \$P_{ud}\$ выше 0,5 \$W/cm\$. Для сравнения на этом же рисунке приведены данные для разрядов в Ne при \$p=2 \text{ mm rt. st.}\$ и в Ar при \$p=4 \text{ mm rt. st.}\$

Закономерности, аналогичные приведенным на рис. 1–4, наблюдаются и для разрядных трубок диаметром 17, 25 и 54 мм. Отметим только, что «веер» кривых \$I=f(P_{ud}, p)\$ становится все более отчетливо выраженным по мере увеличения диаметра, а \$\eta_\vartheta\$ при высоких \$P_{ud}\$ и низком давлении наполняющего газа в обследованном диапазоне увеличивается с увеличением диаметра трубы. На рис. 5 (кривая 1) приведена зависимость \$\eta_\vartheta = f(d_{\text{трубки}})\$ для разряда в аргоне при \$p = 7 \cdot 10^{-2} \text{ mm rt. st.}\$ для \$P_{ud} = 1,5 \text{ W/cm}\$. Это наполнение при указанных условиях обеспечивает максимальный \$\eta_\vartheta\$ во всех сравниваемых разрядах.

Коэффициент полезного действия реальной лампы определяется не только непроизводительными потерями в положительном столбе, но и величиной анодно-катодных потерь. Доля последних несколько возрастает с увеличением мощности разряда: с ростом тока разряда падение напряжения на положительном столбе уменьшается, анодно-катодное падение остается приблизительно постоянным. Благодаря этому значение \$\eta_\vartheta\$ лампы при высоких нагрузках оказывается меньшим, чем при стандартных, даже если \$\eta_\vartheta\$ столба сравниваемых разрядов одинаковы.

С увеличением диаметра трубы градиент потенциала уменьшается и обеспечение задан-

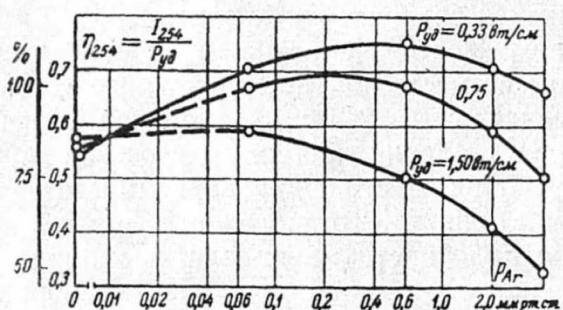


Рис. 3. Изменение энергетического к. п. д. линии \$\lambda = 254 \text{ nm}\$ в ртутно-аргоновом разряде в зависимости от давления аргона для трех значений удельной мощности.

ной мощности в трубках большего диаметра требует увеличения тока, что дополнительно приводит к некоторому увеличению анодно-катодных потерь. В связи с этим $\eta_{\text{э}}$ лампы с увеличением диаметра возрастает медленнее, чем $\eta_{\text{э}}$ столба, и, начиная с диаметра трубы 40 мм, рост $\eta_{\text{э}}$ лампы приостанавливается (рис. 5, кривая 2).

Обсуждение результатов. Приведенные экспериментальные данные подтверждают выводы, изложенные в [Л. 1], о возможности повышения $\eta_{\text{э}}$ сильноточного разряда за счет снижения давления и использования тяжелых наполняющих газов. Снижение p приводит к увеличению длины свободного пробега электронов, сопровождающемуся увеличением электронной температуры и снижением удельной концентрации электронов. Благодаря этому уменьшается количество тушащих соударений, а выход резонансного излучения увеличивается. В условиях, когда роль процессов второго рода мала, на первый план выступают потери на упругие соударения; наименьшие потери имеют место при наполнении, обеспечивающем минимальную величину $1/\lambda_{\text{э}} m_g$. При энергиях электронов до 2,0 эв значение этого параметра для рассматриваемых инертных газов возрастает в следующей последовательности: Ar, Kr, Ne, Xe [Л. 4]. Это объясняет, почему в сильноточном разряде при пониженном давлении наполняющего газа, так же как и в стандартных лампах, наиболее выгодно использовать наполнение аргоном.

Имеющиеся литературные данные о зависимости T_{e} и n_{e} от давления аргона для ртутно-argonового разряда позволяют сравнить экспериментальные и расчетные результаты. Наиболее обстоятельные сведения о зависи-

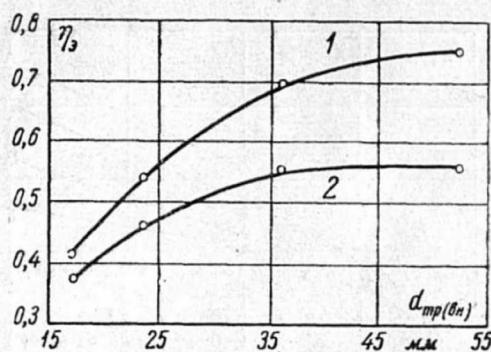


Рис. 5. Зависимость $\eta_{\text{э}}$ разряда от диаметра трубы.

1—для положительного столба $\eta_{\text{э}} = I_{\Sigma}/P_{\text{уд}} = 1,5 \text{ вт/см}$; 2—для лампы мощностью 250 вт $\eta_{\text{э}} = I_{\Sigma} I_{\text{ст}}/P_{\text{л}}, l_{\text{л}} = 1500 \text{ мм}$.

мости $T_{\text{e}}, n_{\text{e}} = f(p)$, относящиеся к разрядному току 0,4 а, получены в работе Вервье [Л. 5]. Они приведены на рис. 6. Аналогичные кривые для больших токов могут быть построены на основании некоторых других экспериментальных результатов этой же работы и работ [Л. 6 и 7]. Эти кривые, показанные на рис. 6 пунктиром, построены для тока 4 а с учетом известного изменения зависимости $n_{\text{e}} = f(i)$ при изменении давления и в предположении, что форма кривой $T_{\text{e}} = f(n_{\text{e}})$ не зависит от давления газа.

На основании кривых (рис. 6) и формул, приведенных в [Л. 1], были произведены расчеты интенсивности $I_{254} = f(i)$ для четырех значений давления и определен энергетический к. п. д. разряда $\eta_{\text{э}} = f(p)$ для двух различных удельных нагрузок. Сопоставление расчетных и экспериментальных кривых показано на рис. 7 и 8. Достаточно близкий ход расчетных и экспериментальных кривых показывает, что в использованных приближенных формулах учитываются все основные параметры и процессы, определяющие генерацию резонансного излучения. Таким же образом мо-

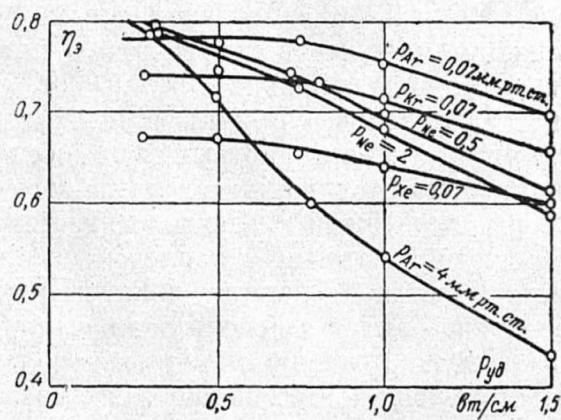


Рис. 4. Энергетический к. п. д. положительного столба разряда $\left(\frac{I_{254} + I_{185}}{P_{\text{уд}}} \right)$ при наполнении лампы различными газами.

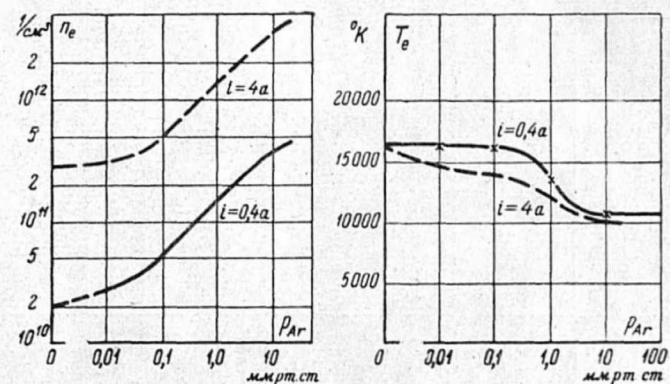


Рис. 6. Электронная концентрация и электронная температура ртутно-argonового разряда в зависимости от давления для $i=0,4 \text{ а}$ [Л. 5] и $i=4 \text{ а}$ [Л. 5, 6 и 7].

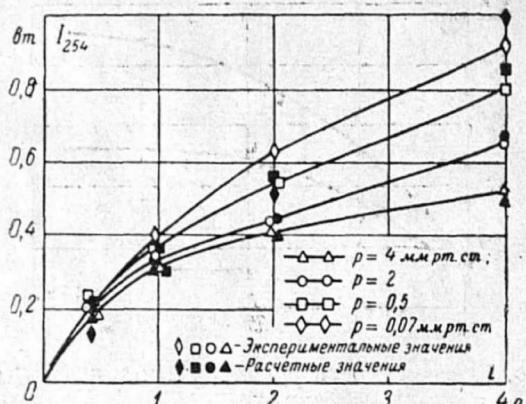


Рис. 7. Зависимость интенсивности линии $\lambda=254$ нм от тока в ртутно-аргоновом разряде.

гут быть оценены эффективности и других представляющих практический интерес разрядов. В табл. 1 приведены значения η_{254} для $P_{уд}=1,5$ вт/см (приблизительно такая нагрузка устанавливается в лампе длиной 1500 мм при общей мощности 250 вт). Данные, указанные в последнем столбце, позволяют судить, насколько снижается выход излучения по отношению к значению этой характеристики в положительном столбе разряда люминесцентной лампы мощностью 40 вт. Величины T_e и n_e , приводимые в табл. 1, пересчитаны по данным работ [Л. 5, 6 и 8].

Коэффициент полезного действия излучения второй резонансной линии $\lambda=185$ нм мало изменяется с увеличением $P_{уд}$ (рис. 1) и определяется в основном только T_e .

Из приведенных результатов следует, что наиболее высокое значение T_e и наименьшее n_e/i устанавливаются в ртутно-аргоновом разряде при $p < 0,1$ мм рт. ст. Величина T_e в этом случае близка к значению T_e в чисто ртутном разряде и выше, чем в смешанных разря-

дах с легкими наполняющими газами. Снижение n_e/i при уменьшении давления позволяет увеличить силу тока и при этом не слишком усилить роль тушащих соударений.

Обработка результатов измерений показывает, что при таком давлении аргона обеспечивается наиболее высокий выход излучения: $\eta_{\vartheta}=0,69$ при $P_{уд}=1,5$ вт/см. Для разряда в криптоне и ксеноне эта величина составляет соответственно 0,65 и 0,59. Во всех указанных случаях величина η_{ϑ} выше, чем в ртутно-неоновом разряде при аналогичных условиях (0,58). Из сравнения этого типа разряда с разрядом, используемым в стандартных лампах, видно, что энергетический к. п. д. положительного столба разряда в аргоне и криптоне при давлении этих газов порядка 0,05—0,10 мм рт. ст. в широком диапазоне мощностей практически совпадает с η_{ϑ} разряда в лампе 80 вт ($\eta_{\vartheta}=0,71$) и имеет величину, близкую к η_{ϑ} разряда стандартной лампы 40 вт ($\eta_{\vartheta}=0,78$) [Л. 3]. Именно при таком наполнении следует ожидать наибольшую световую отдачу в люминесцентных лампах повышенной мощности. Необходимо также отметить, что из приведенных кривых следует, что выбранное для стандартных ламп наполнение аргоном до давления 3—4 мм рт. ст. не является оптимальным: снижение давления до величины порядка 0,5 мм рт. ст. позволит повысить их световую отдачу на 10%.

Макетные образцы. Оценка световой отдачи лампы по энергетическому к. п. д. разряда является недостаточно полной, так как при этом не учитывается видимое излучение разряда и различная чувствительность люминофора к обеим линиям. Поэтому на макетных образцах ламп с люминофором Л-34, используемым для изготовления стандартных ламп, определялись значения светового потока и световой отдачи. Были изготовлены лампы длиной 1500 и 2400 мм с наполнением, обеспечивающим максимальную световую отдачу (Ar и Kr при давлении $7 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.), лампы, наполненные неоном при давлении 2,0 мм рт. ст., и стандартные люминесцентные лампы. Изготовление всех ламп производилось по одной и той же технологии. Результаты измерений ламп представлены в табл. 2.

Расчет световой отдачи положительного столба производился с использованием усредненных значений анодно-катодного падения в соответствующем газе, измеренных на лампах с переменной длиной положительного столба. Из табл. 2 видно, что относительные значения световой отдачи ламп хорошо согласуются с приведенными результатами измерений на кварцевых лампах. Световая отдача

Таблица 1

Наполнение		$n_e, 1/cm^3$	$n_e/i, 1/a \cdot cm^3$	$\eta_{254} = I_{254}/P_{уд}$	$\eta_{254}(P_{уд}=1,5 \text{ вт/см})$	$\eta_{254}(i=0,4 \text{ а}, P_{Ar}=4 \text{ мм рт. ст.})$
Газ	Давление, мм рт. ст.					
Гелий . .	1,0	13 500	$1,2 \cdot 10^{12}$	$6,0 \cdot 10^{11}$	0,43	0,64
Неон . .	1,0	12 500	$0,9 \cdot 10^{12}$	$3,0 \cdot 10^{11}$	0,49	0,73
Аргон . .	1,0	11 500	$1,4 \cdot 10^{12}$	$3,6 \cdot 10^{11}$	0,47	0,71
Криптон . .	1,0	11 000	$3,0 \cdot 10^{12}$	$5,2 \cdot 10^{11}$	0,42	0,62
Аргон . .	$7 \cdot 10^{-2}$	14 000	$0,5 \cdot 10^{12}$	$1,3 \cdot 10^{11}$	0,60	0,83

Примечание. $P_{уд}=1,5$ вт/см, диаметр трубки 38 мм, давление паров ртути $6,3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

Таблица 2

Сравнительные характеристики люминесцентных ламп повышенной мощности в зависимости от рода и давления наполняющего газа

Мощность, вт	Наполнение		Удельная мощность, вт/см	Длина, мм	Световой поток, лм	Световая отдача лампы, лм/вт	% по отно- шению к лам- пе 40 вт	Световая отдача по- ложительного стол- ба, лм/вт
	Газ	Давление, мм рт. ст.						
40	Аргон	4,0	0,33	1200	2160	54	100	63
80	Аргон	4,0	0,5	1500	3920	49	91	58
125	Неон	2,0	0,8	1500	5860	47	88	58
250	Неон	2,0	1,6	1500	9750	39	72	49
125	Аргон	$7 \cdot 10^{-2}$	0,8	1500	6370	51	94	61
250	Аргон	$7 \cdot 10^{-2}$	1,6	1500	11250	45	83	57
400	Аргон	$7 \cdot 10^{-2}$	2,5	1500	15200	38	70	52
400	Аргон	$7 \cdot 10^{-2}$	1,6	2400	19800	49	91	57
250	Криптон	$7 \cdot 10^{-2}$	1,6	1500	10750	43	80	54

Примечание. Диаметр лампы 38 мм, все данные приведены для начальных характеристик ламп (после 3 ч горения).

положительного столба лампы 250 вт, наполненной аргоном до давления $7 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст., практически не отличается от световой отдачи положительного столба лампы 80 вт и выше, чем соответствующая величина в лампах с неоновым наполнением. Значения светового потока стандартных ламп, с которыми производилось сравнение, совпадают со значениями светового потока ламп, выпускаемых промышленностью (ГОСТ 6825-61), и поэтому полученные начальные характеристики ламп повышенной мощности можно оценить как реально достижимые величины.

Выводы. Полученные результаты позволяют сделать определенные выводы о преимуществах наполнения ламп аргоном или криptonом до давления $7 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. [Л. 9]. Принятое в настоящее время наполнение мощных ламп неоном или аргоном до давления 1,2—2,0 мм рт. ст. не является самым выгодным. Это особенно отчетливо видно для ламп с удельной мощностью, большей 1,0 вт/см. При удельной мощности 1,6 вт/см, что соответствует лампе мощностью 250 вт в габаритах лампы 80 вт, уменьшение световой отдачи по сравнению со стандартной люминесцентной лампой 80 вт составляет в наполненных тяжелым газом до низкого давления лампах 9%, а в лампах, наполненных неоном, 21%. Если считать световую отдачу ламп, наполненных неоном, при этой мощности экономически оправданной, то лампы с низким давлением наполняющего газа имеют такую же световую отдачу при мощности 400 вт. Выбранное наполнение является оптимальным для мощных ламп — оно обеспечивает возможность создания различных ламп на мощности от 100 до 400 вт с максимальной,

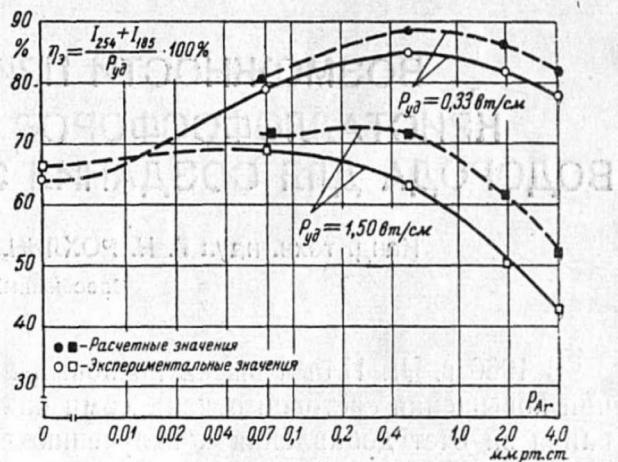


Рис. 8. Зависимость энергетического к. п. д. разряда $\left(\frac{I_{254} + I_{185}}{P_{уд}} \right)$ от давления аргона в лампе.

по сравнению с другими конструктивно приемлемыми наполнениями, световой отдачей.

Весьма серьезной проблемой, возникающей при конструировании мощных люминесцентных ламп, является обеспечение необходимой стабильности работы катодов и люминофора, так как при увеличенных нагрузках процессы старения существенно усиливаются. С этой точки зрения необходимо отметить, что применение в лампах газа при низком давлении, по имеющимся данным, не ухудшает стабильности люминофора по сравнению с другими наполнениями, а при конструировании новых катодов позволяет создать более эффективные способы их защиты от распыления. Перспективным направлением является, по-видимому, конструирование мощных ламп в трубках диаметром 54 мм, так как при этом значительно повышается стабильность светового потока.

Автор статьи приносит свою благодарность В. А. Фабриканту и Ф. А. Бутаевой за ценные указания при проведении настоящей работы, В. Г. Боос и Т. А. Повоцкой за участие в ее выполнении.

Литература

1. Весельницкий И. М., «Светотехника», 1964, № 11.
2. Бутаева Ф. А., Фабрикант В. А., ЖТФ, 1948, т. XVIII, № 9.
3. Bargnes B. T., J. Appl. Phys., 1960, v. 31, № 5.
4. Браун С., Элементарные процессы в плазме газового разряда, Госатомиздат, 1961.
5. Werweij W., Philips Research Rep. Suppl., 1961, № 2.
6. Waymouth J. F., Bitter F., Lowry E. F., III. Eng., 1957, № 5.
7. Клярфельд Б. Н., ЖТФ, 1937, т. VII, № 10.
8. Бутаева Ф. А., ЖТФ, 1946, т. XVI, № 10.
9. Весельницкий И. М., Повоцкая Т. А., Авторское свидетельство № 136.469, Бюллетень изобретений, 1961, № 1.