

УДК 621.327.7

Расчет и оптимизация разрядного контура, термодинамических и излучательных характеристик импульсной ксеноновой лампы инп-7/300

08, август 2012

К.И. Малков

*Студент,
Кафедра «Плазменные энергетические установки»*

*Научный руководитель: А.С. Камруков,
кандидат технических наук, доцент кафедры «Плазменные энергетические
установки»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
lakkarius@rambler.ru

Импульсные лампы – широко распространенные источники излучения оптического диапазона. Данный тип ламп применяется в качестве источников световых импульсов в разнообразной аппаратуре: от миниатюрных узлов медицинских приборов до мощных установок, освещающих значительные площади при ночных аэрофотосъемках.

Для правильного использования существующих типов импульсных ламп, а также создания новых и решения с их помощью прикладных задач необходимо знание физических процессов, протекающих в этих лампах, а также знание связи технических характеристик ламп с их конструктивными и параметрами питания.

Объектом исследования является импульсная ксеноновая лампа ИНП-7/300 (рис.1), основное применение которой - оптическая накачка твердотельных лазеров.

Целью работы являлась разработка инженерной модели расчета и оптимизации разрядного контура, термодинамических и излучательных характеристик.

Расчеты произведены в диапазонах рабочего напряжения (2-5 кВ), допустимой яркостной температуры (8.5 ± 0.5 кК), расчетного ресурса (10^6 - 10^7 вспышек) и энергии (300-1000 Дж), при начальном давлении в колбе лампы 400 мм рт.ст.

Целью оптимизации являлось получение максимальных излучательных характеристик при соблюдении заданных параметров.

Инженерная модель включает в себя последовательный расчет электродинамических характеристик контура и лампы, его оптимизацию с выходом на критический режим работы, расчет времени заполнения канала лампы плазмой, расчет ионизационного состава, термодинамических характеристик, проводимости, спектральных характеристик излучения ксеноновой плазмы и оценку основных эксплуатационных характеристик и теплового режима работы рассматриваемой лампы.

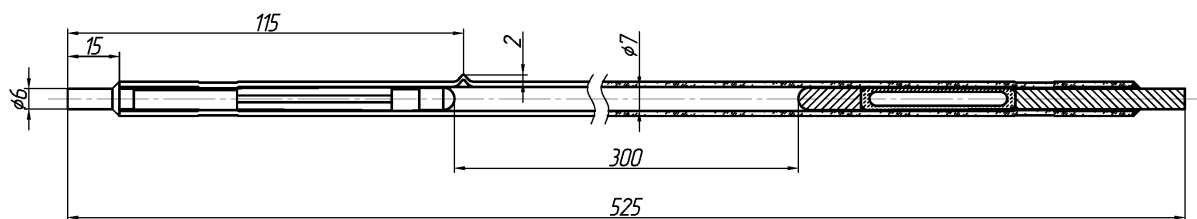


Рис.1. Импульсная ксеноновая лампа ИНП-7/300

Источником питания лампы является импульсный конденсатор, заряжаемый через высоковольтный источник постоянного тока от сети переменного напряжения. Существует несколько широко распространенных принципиальных схем питания импульсных ламп, у каждой из которых есть свои достоинства и недостатки.

Для данной лампы использована схема с последовательным поджигом (рис.2).

Зарядное устройство работает от сети переменного тока. Оно содержит повышающий трансформатор (Тр), мостовой выпрямитель, балластное (защитное) сопротивление (R) и амперметр (А) для контроля тока зарядки. Сопротивление регулируется в процессе зарядки так, чтобы ток через мост не превышал предельно допустимого для диодов. Устройство зажигания содержит импульсный трансформатор (Итр), конденсатор (C_3) и тиристор (Т), который управляется сигналом генератора импульсов. Зарядка этого конденсатора осуществляется от того же источника. Снижение напряжения с рабочего U_0 до требуемого для зарядки C_3 осуществляется подбором регулировочных сопротивлений R_1 и R_2 .

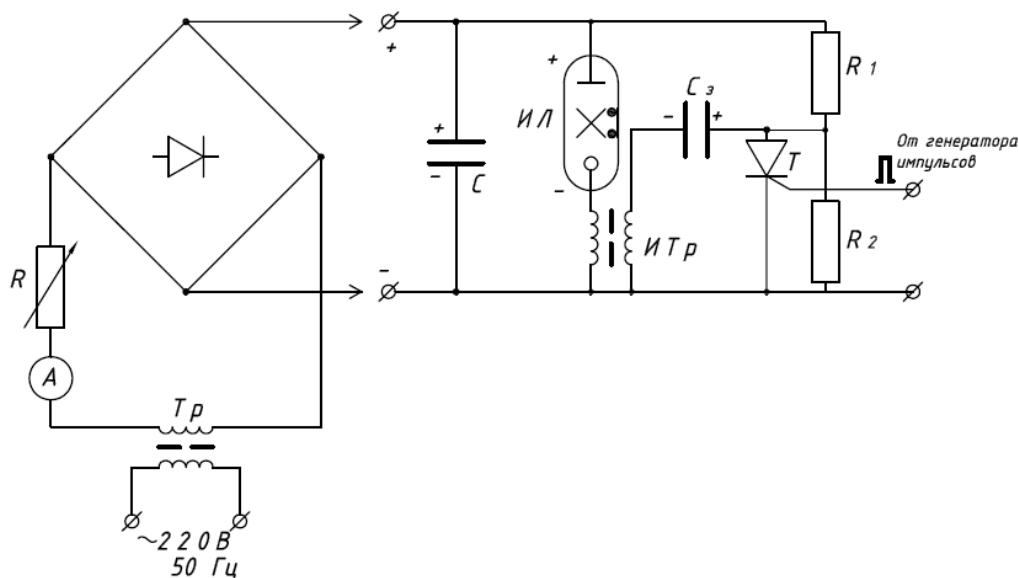


Рис.2. Функциональная схема питания импульсной лампы.

Основной задачей расчета схемы питания является определение оптимальных параметров контура и разряда в лампе. Электротехнический контур характеризуется: напряжением U_0 на конденсаторе перед вспышкой, емкостью конденсатора C , индуктивностью контура L_{Σ} , активным сопротивлением контура R_0 и активным сопротивлением лампы в процессе вспышки $R_{л}$.

В результате расчетов и последующей оптимизации было выявлено, что разряд в лампе имеет высокую эффективность, максимальную светотдачу при значениях напряжения зарядки конденсаторов порядка 3-5 кВ и энергиях импульса порядка 600-1000 Дж. Типовым выбран режим с напряжением 3.5 кВ и энергией 612.5 Дж.

Из заданных яркостной температуры и ресурса была определена рекомендуемая энергия вспышки, из которой была найдена требуемая емкость конденсаторной батареи (100мкФ). По таблице 9.3 из работы [2] был подобран конденсатор К75-40 номинальной емкостью 20 мкФ, рассчитанный на напряжение 5000 В. Конденсаторная батарея состоит из 5 таких конденсаторов, соединенных параллельно. Энергия, накапливаемая в батарее конденсаторов при номинальном напряжении 3.5 кВ, равна $W_0 = 612.5$ Дж.

Расчет контура проводился приближенным методом, достаточно точно аппроксимирующим точное решение электротехнического уравнения.

В результате расчета была подобрана дополнительная индуктивность, представляющая из себя воздушный соленоид, необходимая для приведения электротехнического контура к критическому режиму работы.

Максимум тока в контуре $I_m \approx 1400$ А достигается в момент времени, равный $\tau_m = 147$ мкс. В этот момент времени: плотность тока равна $j_m \approx 3640 \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$, электрическая мощность, рассеиваемая в лампе, максимальна и равна $P_m \approx 2.8$ МВт, сопротивление лампы минимально и равно $R_{л.мин} = 1.42$ Ом.

Характерное время энерговклада в лампу – порядка 210 мкс.

Расчет времени заполнения лампы плазмой был выполнен несколькими способами: по эмпирическим формулам С.И. Андреева, И.С. Маршака, а также по формуле, полученной из автомодельной теории расширения с учетом немгновенного энерговыведения. Согласно расчетам, канал заполняется через 33, 62 и 75 мкс соответственно. Поскольку максимум тока в лампе достигается при $\tau_m = 147$ мкс, можно утверждать, что в лампе реализуется установившийся режим разряда, и в основной стадии процесса все сечение колбы заполнено плазмой.

Температура плазмы рассчитывалась по эмпирическому выражению, справедливому в установившейся квазистационарной стадии разряда, в максимуме разрядного тока ее значение равно $T \approx 12970$ К.

Степень ионизации плазмы $\alpha = \frac{n_e}{n_\Sigma}$, где n_e - концентрация электронов (см^{-3}), n_Σ - суммарное число тяжелых частиц (ядер) в плазме (см^{-3}), определялась из решения квадратного уравнения, следующего из уравнения Саха:

$$\alpha = -\frac{A}{2} + \sqrt{\frac{A^2}{4} + A},$$

где

$$A = 4,9 \cdot 10^{15} \cdot \frac{\Sigma_i}{\Sigma_a} \cdot T^{3/2} \cdot e^{-\frac{I_0 - \Delta I_0}{kT}},$$

Σ_i и Σ_a – статистические суммы иона и атома, I_0 и ΔI_0 – потенциал ионизации и снижение потенциала ионизации атома, эВ (для атома Хе $I_0 = 12,16$ эВ).

Исходными данными для расчета являлись температура плазмы T и n_Σ - суммарное число тяжелых частиц в ней. Поскольку изначально величина снижения потенциала ионизации ΔI_0 не была известна, решение находилось методом последовательных итераций. В результате расчетов были получены: степень ионизации $\alpha = 0.218$, концентрация электронов $n_e = 2.87 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и снижение степени ионизации $\Delta I_0 = 0.312$ эВ.

Внутренняя энергия плазмы с учетом энергии поступательного движения частиц и энергии ионизации равна $\varepsilon \approx 4.75 \frac{\text{эВ}}{\text{част.}}$, учет энергии электронного возбуждения атомов ксенона дает прирост не более чем на 10% до $\varepsilon \approx 5.23 \frac{\text{эВ}}{\text{част.}}$. Удельная внутренняя энергия равна $E_{\text{вн.уд.}} = 3.80 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$. Полная внутренняя энергия

ксеноновой плазмы в момент максимума тока равна $E_{\text{вн.}} \approx 127$ Дж или 21% от запасаемой электрической энергии. В другие моменты времени относительная доля внутренней энергии будет еще меньше.

Эффективный показатель адиабаты был найден из аппроксимации уравнения состояния плазмы, из которого следует, что

$$\gamma = 1 + (1 + \alpha) \cdot \frac{kT}{\varepsilon} = 1.26.$$

Скорость звука в плазме найдена из выражения

$$c_{\text{зв}} = \sqrt{\gamma \cdot (\gamma - 1) \cdot E_{\text{вн.уд.}}} = 1117 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Скорость звука определяет характерное время выравнивания газодинамических параметров плазмы по объему, для данного режима работы оно равно $\tau_{\text{гд}} = 6$ мкс. Это время более чем в 30 раз меньше характерного времени разряда в лампе $\tau_m = 147$ мкс, поэтому в основной стадии разряда давление по объему лампы можно считать выровненным.

Расчет электрической проводимости плазмы проводился в рамках нескольких приближений. В первом приближении проводимость находилась по формуле Спитцера для однократно ионизованной плазмы. Полученное значение проводимости $(89.2 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1})$ является завышенным и не согласуется с экспериментальными данными, для которых значение проводимости можно найти по аппроксимационной формуле: $\sigma \approx 4 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 = 57.7 (\text{Ом} \cdot \text{см})^{-1}$. Расхождение теории и эксперимента обусловлено проявлением эффектов неидеальности плазмы. Для учета последних, так как значение кулоновского логарифма получилось меньше $\ln \Lambda < 3,2$, его значение принималось равным $\ln \Lambda = 3,2$. В работе [1] эффекты неидеальности плазмы предлагается учитывать с помощью эффективного заряда ионов.

Сравнение результатов расчетов показывает хорошее согласование с экспериментом предложенных методов учета неидеальности плазмы.

Спектральные коэффициенты поглощения рассчитывались 2 способами: по эмпирической зависимости, предложенной С.И. Андреевым в [3], и теории Бибермана-Нормана-Андреева.

Спектральный поток P_λ , спектральная сила излучения I_λ (рис.3), яркостная температура (рис.4) рассчитывались по учитывающим неидеальность плазмы зависимостям, предложенным С.И. Андреевым в [3]. Для яркостной температуры дополнительно была дана оценка по эмпирической формуле $T_{\text{я}} \approx 570 \cdot P_s^{0,25}$ (где P_s – поверхностная плотность электрической мощности лампы), пригодной для оценки яркостной температуры с приемлемой точностью ($\pm 10\%$).

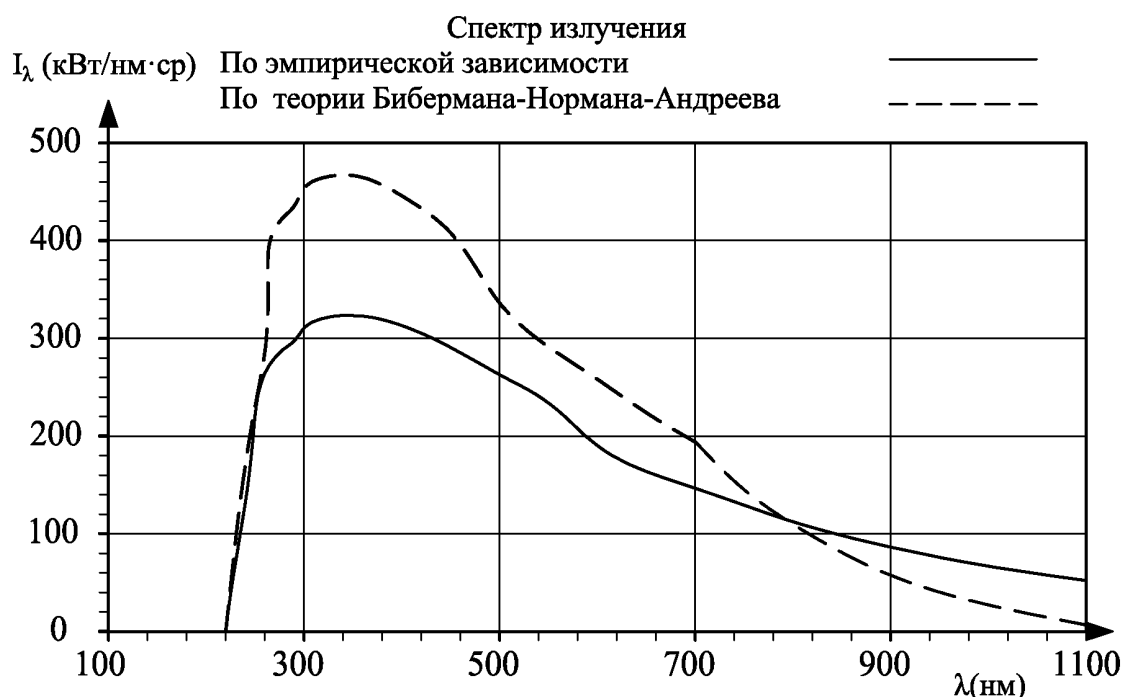


Рис.3. Спектр излучения лампы ИНП-7/300 при напряжении 3500В и энергии импульса 612,5Дж

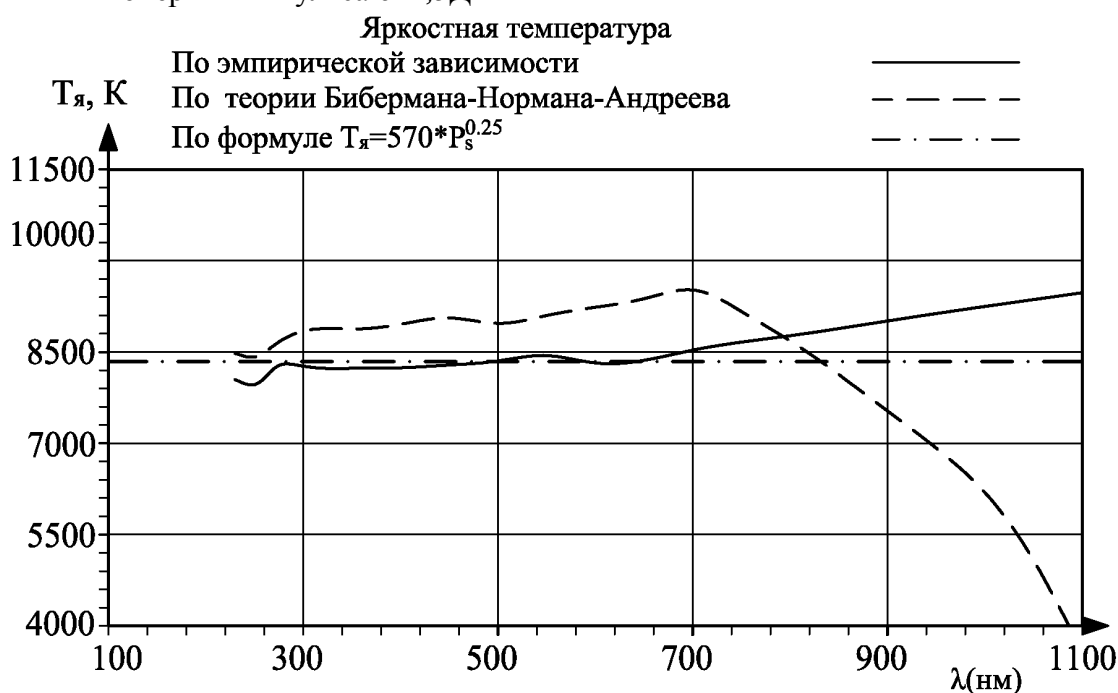


Рис.4. Яркостная температура излучения лампы ИНП-7/300 при напряжении 3500В и энергии импульса 612,5Дж

Результаты расчетов теоретических значений коэффициентов поглощения ксеноновой плазмы для различных длин волн, оптическая толщина лампы и рассчитанные по ним спектральные характеристики приведены в таблицах 1 и 2.

Сила света лампы равна: $I_{св} = 23.8$ Мкд при расчете коэффициента поглощения по эмпирической формуле и $I_{св} = 20$ Мкд при расчете k'_λ по формуле Бибермана-Нормана-Андреева.

Интегральная по спектру сила излучения лампы равна $I = 2.01 \cdot 10^5 \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}$.

Расчетно-теоретическая оценка пиковой мощности излучения:

$$P_{\text{изл}} \approx \pi^2 \cdot I = 1.98 \cdot 10^6 \text{ Вт.}$$

Оценочные значения для энергии и интегрального КПД излучения лампы:

$$E_{\text{изл}} \approx P_{\text{изл}} \cdot \tau_{0,5} = 401.2 \text{ Дж, } \eta_{\text{изл}} = \frac{E_{\text{изл}}}{W_0} \approx 0,65 (65 \%).$$

Таблица 1.

Результаты расчетов спектральных характеристик лампы ИНП-7/300 по эмпирическим коэффициентам поглощения плазмы

λ , нм	190	230	270	300	350	430	555	700	850	1000	1500
k_λ , см ⁻¹	0.09	0.13	0.18	0.22	0.30	0.43	0.67	0.99	1.33	1.69	2.97
τ_λ	0.06	0.09	0.13	0.16	0.21	0.30	0.47	0.69	0.93	1.19	2.08
$K_{\lambda \text{ ст}}$	0,0	0,65	0,9	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
P_λ , Вт/нм	0	1605	2763	3064	3191	2966	2280	1446	971	658	208
I_λ , Вт/ср.нм	0	163	280	310	323	300	231	147	98	67	21
B_λ , Вт/см ² ·ср.нм	0,0	7.7	13.3	14.8	15.4	14.3	11	7	4.7	3.2	1
T_λ , К	–	8050	8288	8267	8231	8263	8451	8532	8888	9247	10194

Таблица 2.

Результаты расчетов спектральных характеристик лампы ИНП-7/300 по коэффициентам поглощения, найденным по формуле Бибермана-Нормана-Андреева

λ , нм	190	230	270	300	350	430	555	700	850	1000
$h\nu$, эВ	6,53	5,39	4,59	4,13	3,54	2,88	2,23	1,77	1,46	1,24
k_λ , см ⁻¹	0.09	0.13	0.18	0.22	0.30	0.43	0.67	0.99	1.33	1.69
τ_λ	0.06	0.09	0.13	0.16	0.21	0.30	0.47	0.69	0.93	1.19
$K_{\lambda \text{ ст}}$	0,0	0,65	0,9	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
P_λ , Вт/нм	0	2384	4067	4478	4606	4189	2883	1910	793	267
I_λ , Вт/ср.нм	0	242	412	454	467	424	292	194	80	27
B_λ , Вт/см ² ·ср.нм	0,0	11.5	19.6	21.6	22.2	20.2	13.9	9.2	3.8	1.3
T_λ , К	–	8480	8817	8843	8878	9015	9111	9518	8143	6193

Предельная электрическая энергия импульса, начиная с которой лампа разрушается, составляет $W_{\text{пред.}} \approx 4032 \text{ Дж}$, следовательно, фактор нагрузки равен $\beta \approx 0.22$. Максимальное число импульсов, которое может выдержать лампа при такой нагрузке $N_{\text{max}} \approx 9.1 \cdot 10^6 \text{ имп.}$, что удовлетворяет требуемой величине ресурса.

Максимальная частота следования импульсов при работе лампы в импульсно-периодическом режиме составляет около 2.3 Гц при естественном воздушном охлаждении, 4.6 Гц в условиях принудительного воздушного охлаждения и 30.8 Гц в условиях принудительного водяного охлаждения.

Максимальная температура внутренней кварцевой стенки лампы достигается в предельном энерго-мощностном режиме с водяным охлаждением и составляет $T_{\text{ст. max}} = 1660 \text{ К}$, что значительно меньше температуры кипения кварца ($T_{\text{к}} > 3650 \text{ К}$),

следовательно, эффектов обратимой непрозрачности кварца наблюдаться не должно.

Лампа ИНП-7/300 в рассмотренном режиме работы имеет высокую мощность импульса, высокий интегральный КПД излучения, а расчетные ресурс работы и яркостная температура удовлетворяют исходным данным.

При помощи разработанной инженерной модели возможно быстро произвести расчет различных режимов работы рассмотренной лампы, необходимых в различных сферах задач, таких как: накачка лазеров, фотохимическое производство, очистка и обеззараживание объектов окружающей среды, медицина, косметология, разработка оружия оптико-электронного противодействия и других.

Литература

1. Камруков А.С., Кулебякина А.И. Инженерные методы расчета импульсных ксеноновых ламп: Учебн. пособие / под ред. Н.П.Козлова; кафедра «Плазменные энергетические установки» (Э8). – М.: ООО НИЦ «Инженер» (Союз НИО), 2010. – 222 с.
2. Маршак И.С., Дойников А.С., Жильцов В.П. [и др.] Импульсные источники света / - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергия, 1978. – 472 с.
3. Андреев С.И., Ивасенко Н.Ф. Основы расчета импульсных ксеноновых ламп / . – Томск: Изд-во Томского ун-та, 1982.- 147 с.