

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

НА ТЕМУ:

Расчет термодинамических и спектральных характери-
стик плазмы в импульсных ксеноновых лампах устано-
вок фотонного отжига

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ.....	11
Исходные данные	11
1. Расчет электротехнических параметров разрядного контура	12
1.1. Расчет индуктивности и паразитного сопротивления контура	14
1.2. Определение максимального тока в лампе.....	16
2. Расчет термодинамических параметров плазмы и излучательных характеристик импульсной ксеноновой лампы ИНП-7/80 в установке фотонного отжига.....	21
2.1. Расчет времени заполнения лампы плазмой	21
2.2. Расчет температуры плазмы.....	21
2.3. Расчет ионизационного состава плазмы	22
2.4. Расчет внутренней энергии плазмы	23
2.5. Расчет скорости звука и давления в плазме	23
2.6. Расчет проводимости плазмы	24
2.7. Расчет излучательных характеристик.....	25
2.8. Оценка основных эксплуатационных характеристик лампы	30
2.9. Оценка теплового режима колбы лампы	31
3. Результаты расчетов для ламп ИФП 2000	31
3.1. Параметры электротехнического контура лампы ИФП 2000	34
3.2. Расчет термодинамических параметров плазмы ламп ИНП-7/80 и ИФП 2000	35
3.3. Расчет спектральных характеристик ламп ИНП-7/80 и ИФП 2000	36
3.4. Оценка основных эксплуатационных характеристик импульсных ламп ИНП-7/80 и ИФП 2000.....	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	40
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	41
ПРИЛОЖЕНИЕ	42

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы: расчет электротехнических параметров разрядного контура, термодинамических параметров плазмы и излучательных характеристики одной из трех, последовательно подключенных, импульсной ксеноновой лампы ИНП-7/80 при рабочем напряжении $U_0=850$ В и емкости конденсаторной батареи $C = 5575$ мкФ, а также сравнение с параметрами плазмы и излучательных характеристик импульсной ксеноновой лампы ИФП 2000 в том же электрическом контуре установки для фотонного отжига.

Объектом исследования является импульсная лампа в установке фотонного отжига – газоразрядный, отпаянный прибор, предназначенный для получения импульсов интенсивного оптического излучения с помощью сильноточного импульсного разряда в газах.

Сегодня уровень развития импульсных источников оптического излучения достигает промышленных масштабов. Ведутся работы по миниатюризации конструкций, повышению эффективности источников питания, увеличению световой отдачи излучателей, получению требуемого спектрального состава излучения. Целью данной работы является ознакомление с устройством и принципом работы импульсной лампы, а также расчет основных параметров и сравнение параметров двух различных импульсных ламп в одинаковом контуре.

В настоящее время импульсные лампы широко применяются в области производства электрических плат посредством импульсного фотонного спекания наночастиц электропроводного материала. Под действием высокоэнергетичного импульсного (порядка 100 мкс) излучения наночастицы металла спекаются между собой и образуют электропроводящие дорожки. В отличие от фотолитографии, данный способ не требует вакуумной системы и опасных химических веществ. За счёт импульсного процесса нагрев происходит только на облучаемой поверхности и имеет малую глубину проникновения, что позволяет не оказывать разрушительного термического воздействия на материал платы. За счёт импульсного процесса нагрев происходит только на облучаемой поверхности и имеет

малую глубину проникновения, что позволяет не оказывать разрушительного термического воздействия на материал платы. Благодаря этому в качестве материала плат, могут быть использованы различные виды пластиков, тонкие плёнки, органические подложки. Так же данный способ позволяет создавать гибкие электрические платы.

Для технологии фотонного спекания существуют несколько основных методов, таких как: быстрый термический отжиг галогеновыми лампами, спекание импульсным излучением лампы, импульсный лазерный отжиг. Наиболее популярным методом является метод лазерного отжига. Он позволяет нагревать материал со скоростью порядка 10^8 К/с, а благодаря малому времени нагрева (порядка 1-1000 нс) температура подложки, на которой находится спекаемый материал, не успевает повыситься слишком сильно. Однако такой метод требует больших затрат по времени.

Альтернативным методом является использование импульсных ксеноновых ламп в составе установок спекания, они позволяют сохранить преимущества лазерного метода: скорость нагрева 10^4 - 10^7 К/с и слабый нагрев подложки, а также их меньшая энергетическая мощность позволяет работать с органическими материалами без их разрушения, широкий спектр излучения позволяет обрабатывать различные виды материалов, а площадь облучения значительно ускоряет процесс работы[1].

Для процессов фотонного отжига необходима большая энергия и равномерное облучение достаточно большой площади обрабатываемой поверхности. В связи с этим появилась необходимость исследовать контур с тремя последовательно подключенными лампами ИНП – 7/80, благодаря которым можно получить равномерный поток на большой поверхности, и сравнение полученных характеристик с лампой ИФП 2000.

В импульсных газоразрядных лампах реализуется сильноточный дуговой разряд. При этом электрическая энергия вводится в среду в течение короткого промежутка времени (10^{-5} ... 10^{-3} с), в результате чего достигается чрезвычайно

высокая удельная мощность энерговклада, позволяющая реализовать широкий диапазон термодинамических параметров и состояний электроразрядной плазмы и обеспечить высокоинтенсивный характер генерируемого излучения.

Конструктивно импульсные газоразрядные лампы делятся на трубчатые и шаровые. У трубчатых ламп расширение плазмы ограничивается стенками колбы. Форма лампы может быть прямая цилиндрическая, спиральная, U-образная, кольцевая, коаксиальная и др. У шаровых ламп колбы не обязательно имеют форму шара; для этих ламп характерным является малый объем области разряда, и стабилизация дуги электродами.

Трубчатая импульсная лампа представляет собой цилиндрическую трубку из прозрачного оптического материала (внутренний диаметр $d = 3 \dots 20$ мм, длина межэлектродного промежутка $l = 50 \dots 1000$ мм) с запаянными по концам вольфрамовыми электродами. Толщина стенки колбы обычно составляет ~ 1 мм, для ламп с $d > 12 - 1,25 \dots 1,5$ мм [2].

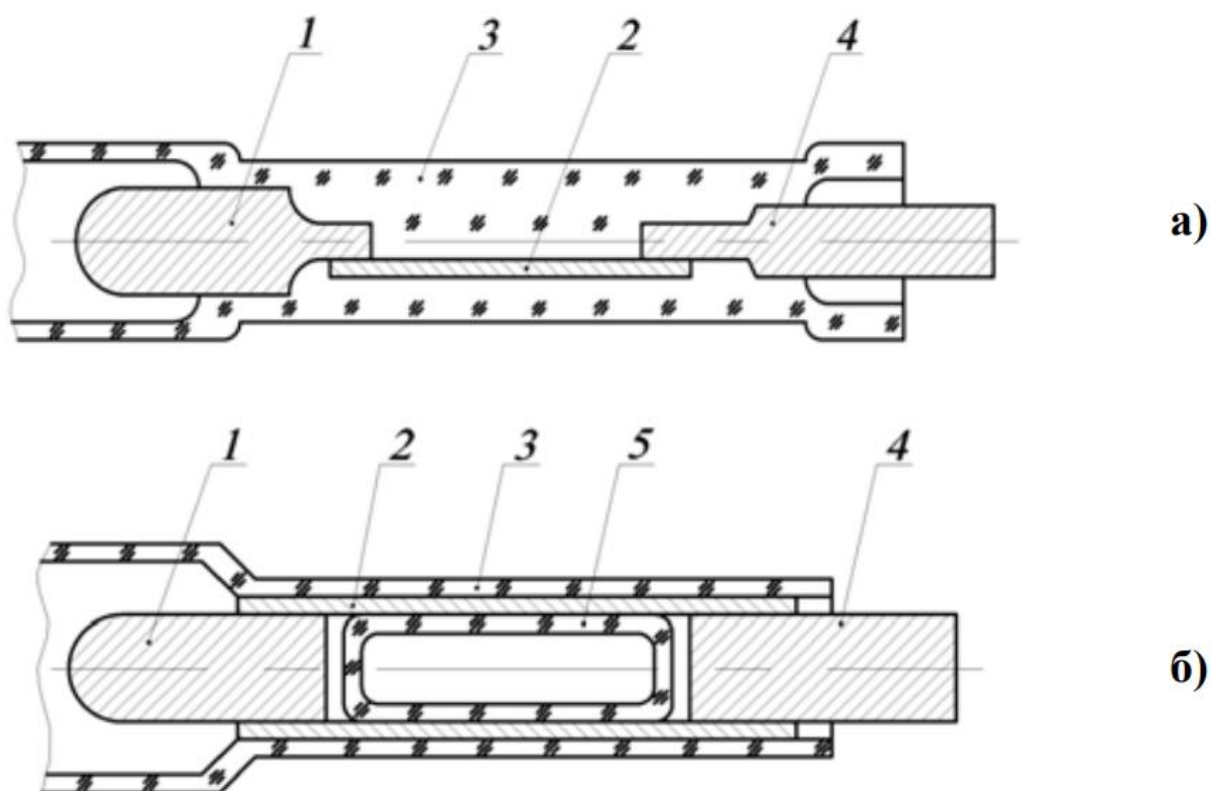
Оболочки ламп изготавливают из боросиликатного или кварцевого стекла. Боросиликатное стекло характеризуется невысокой термической стойкостью (до 200°C) и непрозрачностью в УФ области, поэтому в основном используется для осветительных целей. Кварцевое стекло имеет высокую термостойкость (до 800°C) и широкий спектр пропускания – от вакуумного УФ до средней ИК области.

Большинство импульсных ламп заполняется спектрально чистым ксеноном, обеспечивающим максимальную эффективность преобразования электрической энергии в излучение практически во всем диапазоне длин волн, а также наибольшую долговечность.

Для анода определяющим является отвод энергии бомбардирующих электронов, тогда как для катода важно обеспечить достаточное количество электронов в разрядном промежутке без распыления своей поверхности. Катодным материалом служит вольфрам с присадками оксидов тория и иттрия. Аноды изготавливают из чистого вольфрама или вольфрама с добавлением лантана.

В промышленных типах кварцевых импульсных ламп наибольшее распространение получили токовводы следующих конструкций:

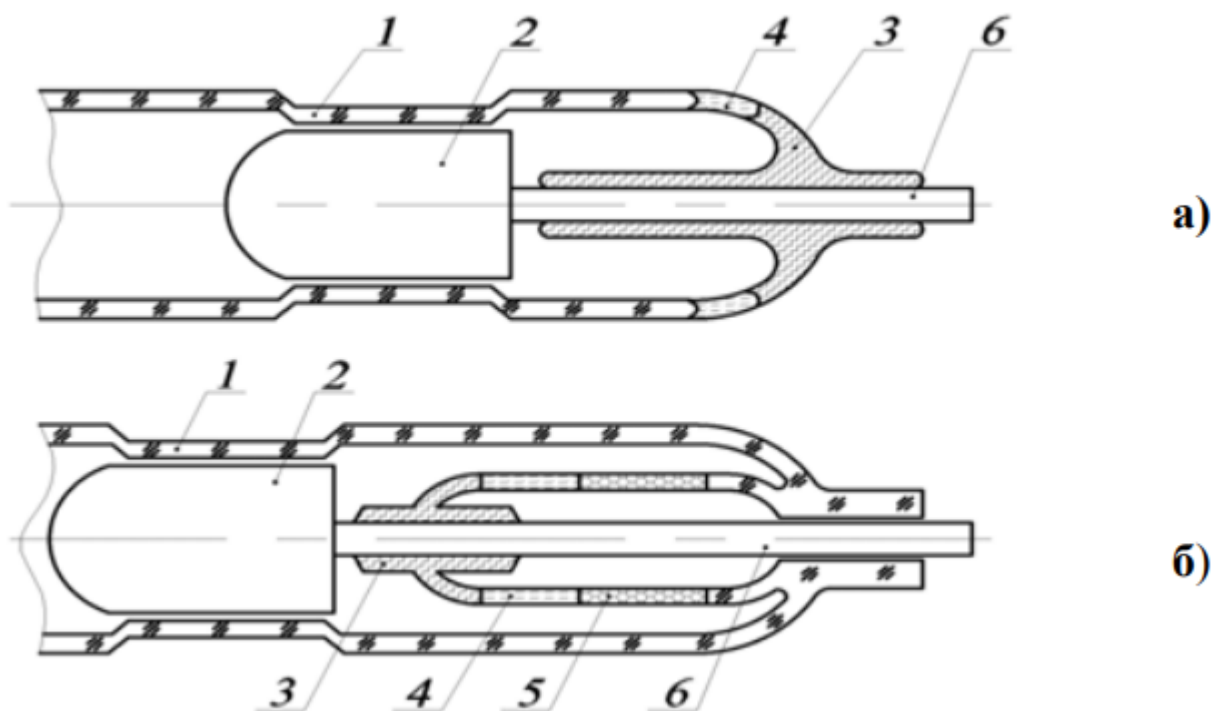
- фольговые (плоские и цилиндрические) вводы (используется обычно молибденовая фольга) (рисунок В1).



1 – электрод, 2 – молибденовая фольга, 3 – кварцевая оболочка, 4 – металлический токоподвод, 5 – кварцевый вкладыш

Рисунок В1 – Токоввод в газоразрядную лампу на основе переходных стекол с прямым (а) и обратным (б) спаем [3]

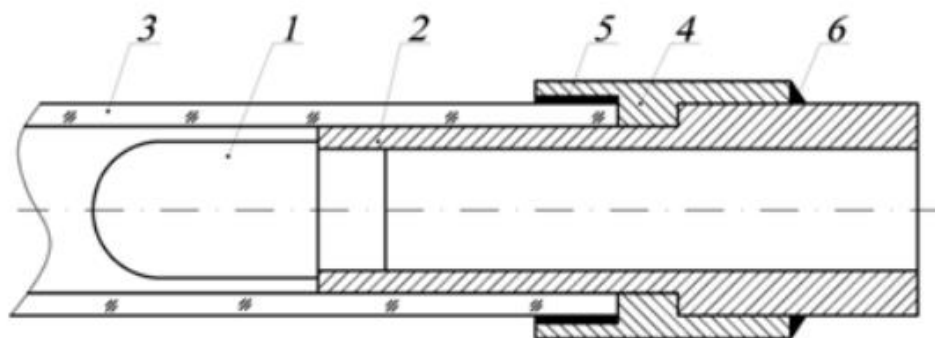
- стержневые вводы на переходных стеклах (токоввод спаивается с кварцевой оболочкой через стекла с промежуточными значениями коэффициента температурного расширения) (рисунок В2).



1 – кварцевая оболочка, 2 – электрод, 3, 4, 5 – слои переходных стекол, 6 – вольфрамовый стержневой токоподвод [3].

Рисунок В2 – Токоввод в газоразрядную лампу на основе переходных стекол с прямым (а) и обратным (б) спаем

- колпачковые вводы с соединением мягкими припоями (рисунок В3).



1 – электрод, 2 – металлический токоподвод, 3 – кварцевая оболочка, 4 – металлический колпачок, 5 – легкоплавкий припой, 6 – зона лазерной сварки.

Рисунок В3 – Токоввод в газоразрядную лампу на основе паяного металлического колпачка [3]

Фольговые вводы наиболее универсальны, плоские вводы применяются в маломощных стробоскопических лампах. Колпачковые вводы имеют ограничение по уровню рабочих температур (не выше 200 °С) и предпочтительны для ламп с большой энергией в импульсе.

Источником питания лампы является импульсный конденсатор, заряжаемый через высоковольтный источник постоянного тока от сети переменного тока. Простейшая схема высоковольтного источника постоянного тока для заряда конденсатора включает трансформатор, повышающий напряжение с сетевого до рабочего напряжения лампы $U_0 \sim 1 \dots 5$ кВ, диодного выпрямительного моста и сопротивления, ограничивающего ток зарядки конденсатора.

В схеме запуска лампы с последовательным поджигом (рисунок В4) вторичная обмотка импульсного трансформатора встраивается в разрядный контур; в этом случае высоковольтный импульс поджига непосредственно подается на один из электродов лампы. Эта схема поджига обеспечивает минимальные задержки и временной разброс инициирования разряда (менее 1...3 мкс) и низкий уровень внешних электромагнитных помех. Однако габариты и стоимость импульсного трансформатора в этом случае значительно возрастают, так как его вторичная обмотка должна быть рассчитана на большие токи и минимальные омические потери.

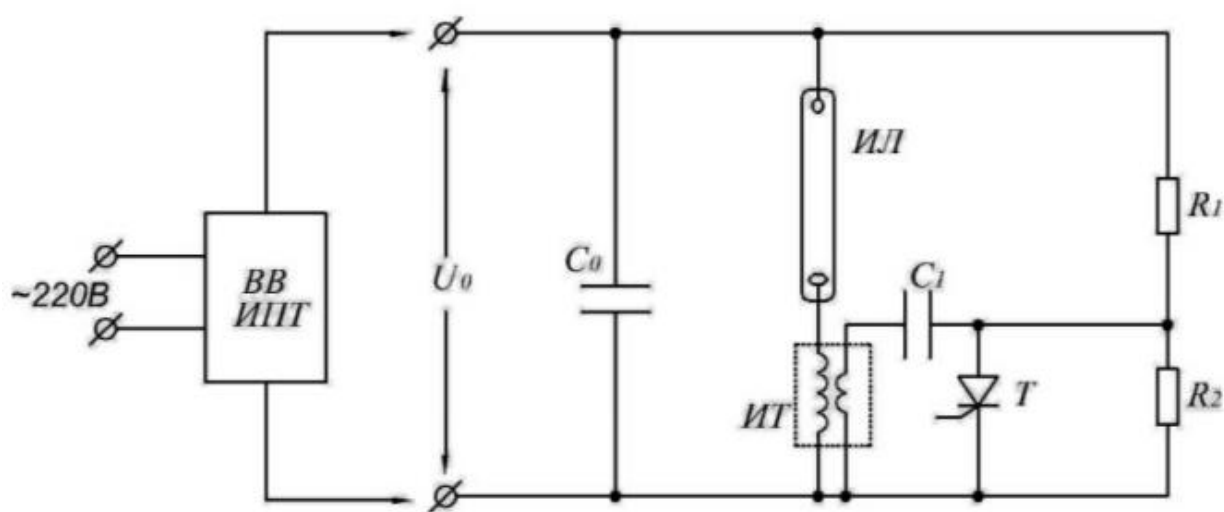


Рисунок В4 – Схема включения с последовательным поджигом [1]

Трубчатые ксеноновые лампы могут работать как в режиме мощных однократных вспышек, так и в импульсно-периодическом режиме, частота повторения импульсов варьируется от долей герц до нескольких сотен герц. При этом одна и та же импульсная лампа может эффективно работать в широком диапазоне изменения электрических и энергомощностных параметров.

Электрические и излучательные характеристики импульсных ламп не зависят от параметров окружающей среды. Лампы могут эксплуатироваться при температуре окружающей среды от -60 до +85 °С. Пространственное положение ламп не влияет на их излучательные характеристики.

Для импульсных ламп характерно практически мгновенное включение, т.е. не требуется дополнительного времени на разгорание и выход лампы на рабочий режим [2].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Исходные данные

$U_0 = 850$ В – рабочее напряжение;

$p_0 = 400$ торр – начальное давление;

$C = 5575$ мкФ – емкость конденсатора батареи;

$l = 0,080$ м – длина межэлектродного промежутка;

$d = 0,007$ м – внутренний диаметр лампы;

$d_{\text{нар}} = 0,009$ м – наружный диаметр лампы;

Используемые величины и физические константы

$\mu_{\text{пл}} = 1$ – относительная магнитная проницаемость плазмы;

$\mu_{\text{с}} = 1$ – относительная магнитная проницаемость сердечника;

$\rho_{\text{Cu}} = 1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – удельное сопротивление меди;

$\mu_{\text{Cu}} = 1$ – относительная магнитная проницаемость меди

$l_{\text{пр}} = 2$ м – полная длина проводов;

$S_{\text{пр}} = 4$ мм² – площадь сечения центральной жилы провода [4];

$D_1 = 125$ мм – внешний диаметр сердечника трансформатора;

$D_2 = 80$ мм – внутренний диаметр сердечника трансформатора;

$N_{\text{ИТ}}$ – количество витков вторичной обмотки трансформатора;

$R_1 = 64$ мм – внешний радиус сечения витка;

$R_2 = 32$ мм – внутренний радиус сечения витка;

$H_{\text{ИТ}} = 27$ мм – высота сердечника;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м – магнитная постоянная;

$\rho_0 = 3,08$ кг/м³ – давление ксенона при 400 торр;

$\alpha_0 = 0,3$ – безразмерная константа для расчета скорости расширения плазмы;

$I_0 = 12,16$ эВ – энергия ионизации ксенона [5];

$\sum_i = 4$ – статический вес иона ксенона;

$\sum_a = 1$ – статический вес атома ксенона;

$M_0 = 2,2 \cdot 10^{-25}$ кг – масса атома ксенона [5];

$P_{s \text{ пр}1} = 15 \text{ Вт/см}^2$ – поверхностная плотность средней электрической мощности в условиях естественной воздушной конвекции.

$P_{s \text{ пр}2} = 30 \text{ Вт/см}^2$ – поверхностная плотность средней электрической мощности в условиях вынужденной воздушной конвекции.

$P_{s \text{ пр}3} = 200 \text{ Вт/см}^2$ – поверхностная плотность средней электрической мощности в условиях вынужденной водяной конвекции.

1. Расчет электротехнических параметров разрядного контура

В ходе курсовой работы был проведен расчет параметров импульсной ксеноновой лампы трубчатого типа ИНП - 7/80 и ИФП2000 с рабочим напряжением $U_0 = 850 \text{ В}$ и емкости конденсатора $C = 5575 \text{ мкФ}$.

Лампы предназначены для эксплуатации как в режиме одиночных импульсов, так и в мощных импульсно-периодических режимах. Широко применяется в системах оптической накачки твердотельных лазеров. Конструктивные чертежи ламп показан на рисунках 1.1, 1.2.

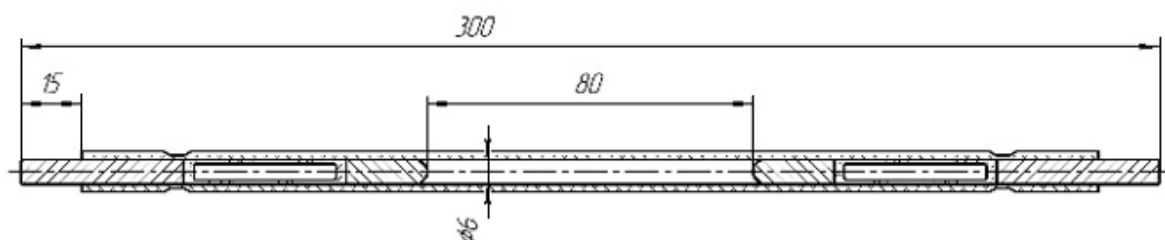


Рисунок 1.1 – Импульсная ксеноновая лампа ИНП-7/80.

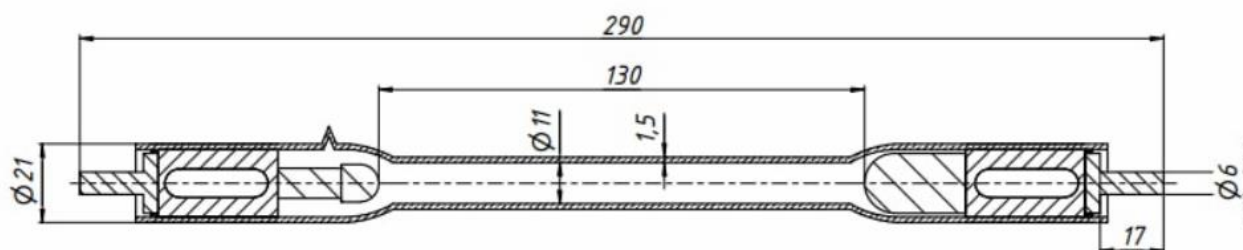


Рисунок 1.2 – Импульсная ксеноновая лампа ИНП-7/80.

Для питания лампы выбрана схема с последовательным поджигом (рисунок 1.3), которая обеспечивает возможности работы лампы в широком диапазоне энерго-мощностных режимов, включая режимы с жидкостным охлаждением.

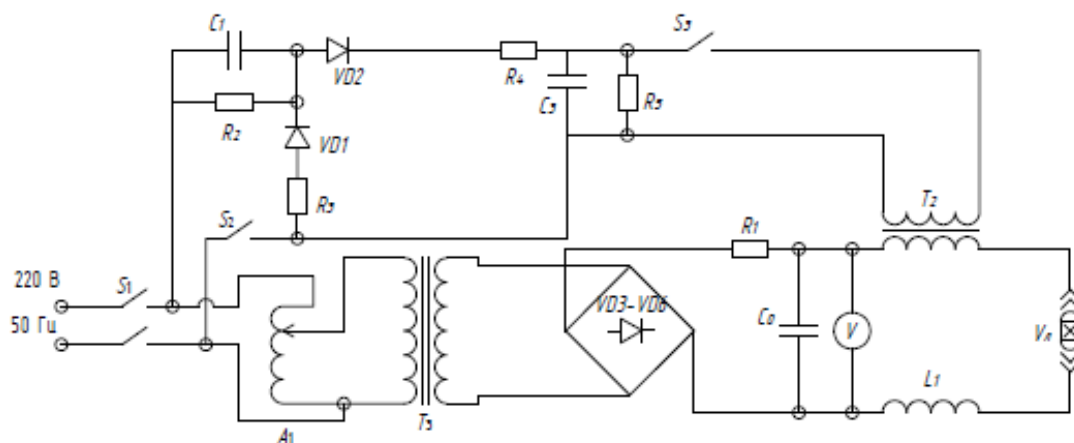


Рисунок 1.3 – Функциональная схема питания импульсной лампы

Зарядное устройство работает от сети переменного тока. Оно содержит лабораторный автотрансформатор A_1 и повышающий трансформатор T_3 , мостовой выпрямитель $VD3-VD6$, балластное сопротивление R_1 и вольтметр V для контроля зарядки.

Устройство зажигания содержит импульсный трансформатор T_3 , конденсатор C_3 , схему удвоения $C_1-R_3-D_1$, токоограничивающее сопротивление R_4 . С помощью резистора R_5 происходит разрядка конденсатора C_3 в случае отсутствия разряда при выключении установки.

Для удобства расчета функциональная схема питания заменена на эквивалентную схему (рисунок 1.4).

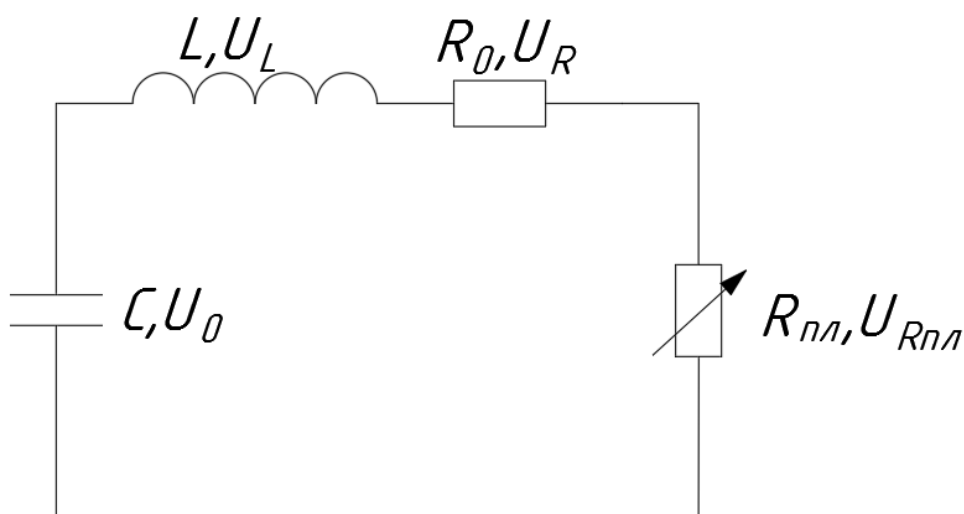


Рисунок 1.4 – Эквивалентная схема электротехнического контура с пламенной нагрузкой.

В величину полной индуктивности контура L входит индуктивность проводов, вторичной обмотки импульсного трансформатора и лампы. В величину паразитного сопротивления контура R_0 входит активное сопротивление конденсатора, проводов и вторичной обмотки импульсного трансформатора.

1.1. Расчет индуктивности и паразитного сопротивления контура

Конструктивный параметр лампы:

$$K_0 = 1,27 \left(\frac{l}{d} \right) \left(\frac{p_0}{450} \right)^{0.2} = 1,27 \cdot \left(\frac{80}{7} \right) \cdot \left(\frac{400}{450} \right)^{0.2} = 14,18 \quad (1.1.1)$$

Площадь поперечного сечения лампы:

$$S_{\text{л}} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,7^2}{4} = 0,385 \text{ см}^2 \quad (1.1.2)$$

Энергия, запасаемая конденсатором:

$$W_0 = \frac{CU^2}{2} = \frac{5575 \cdot 10^{-6} \cdot 850^2}{2} = 2013 \text{ Дж} \quad (1.1.3)$$

Радиус центральной жилы провода:

$$r_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{S_{\text{пр}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 11,28 \cdot 10^{-4} \text{ м} \quad (1.1.4)$$

Индуктивность проводов вне трансформатора:

$$L_{\text{пр}} = \frac{\mu_0 l_{\text{пр}}}{2\pi} \left(\ln \frac{2l_{\text{пр}}}{r_{\text{пр}}} - 1 + \frac{\mu_{\text{Cu}}}{4} \right) = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2}{2\pi} \left(\ln \frac{2 \cdot 1,60}{11,28 \cdot 10^{-4}} - 1 + \frac{1}{4} \right) = 5,73 \text{ мкГ} \quad (1.1.5)$$

Индуктивность лампы:

$$L_{\text{л}} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{4l}{d} - 1 + \frac{\mu_{\text{пл}}}{4} \right) = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,08}{2\pi} \left(\ln \frac{4 \cdot 0,080}{0,007} - 1 + \frac{1}{4} \right) = 0,049 \text{ мкГ} \quad (1.1.6)$$

Длина средней линии сердечника:

$$l_{\text{ИТ}} = 0,5\pi(D_1 + D_2) = 0,5\pi(0,125 + 0,080) = 0,322 \text{ м} \quad (1.1.7)$$

Площадь сечения витка:

$$S_{\text{ИТ}} = H_{\text{ИТ}}(R_1 - R_2) = 0,027(0,064 - 0,032) = 8,63 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (1.1.8)$$

Индуктивность вторичной обмотки импульсного трансформатора:

$$L_{\text{ИТ}} = \mu_0 \mu_c \frac{N_{\text{ИТ}}^2}{l_{\text{ИТ}}} S_{\text{ИТ}} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \frac{50^2}{0,322} \cdot 8,63 \cdot 10^{-4} = 8,42 \text{ мкГн} \quad (1.1.9)$$

Полная длина провода вторичной обмотки трансформатора:

$$l_{\text{прИТ}} = 2N_{\text{ИТ}}(H_{\text{ИТ}} + R_1 - R_2) = 2 \cdot 50 \cdot (0,032 + 0,064 - 0,032) = 5,9 \text{ м} \quad (1.1.10)$$

Для установок фотонного отжига необходим сильно закритический режим работы. Что бы получить такой режим, необходимо увеличить индуктивность контура. Для этого добавим дроссель в виде тороидальной катушки с индуктивностью $L_{\text{доп}} = 15,8 \text{ мкГн}$.

Полная индуктивность электротехнического контура с лампой:

$$L_{\Sigma} = L_{\text{пр}} + L_{\text{ИТ}} + L_{\text{л}} + L_{\text{доп}} = (5,73 + 8,42 + 0,049 + 15,8) \cdot 10^{-6} = 30 \text{ мкГн} \quad (1.1.11)$$

Количество витков провода в соленоиде:

$$N_k = \frac{L_{\text{доп}} \cdot 2(r + l_{\text{из}})}{\mu_0 \cdot \mu \cdot \pi(r_k + r + l_{\text{из}})^2} = \frac{15,8 \cdot 10^{-6} \cdot 2(1,13 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 10^{-3})}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \pi(50 \cdot 10^{-3} + 1,13 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 10^{-3})^2} = 5, \quad (1.1.12)$$

где r – радиус провода, 1,13 мм,

$l_{\text{из}}$ – толщина изоляции провода, 0,5 мм,

r_k – радиус трубки сердечника, 50 мм.

Длина провода в катушке:

$$l_{\text{прК}} = 2N_k \pi(r_k + r + l_{\text{из}}) = 2 \cdot 5 \cdot \pi(50 \cdot 10^{-3} + 1,13 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 10^{-3}) = 1,6 \text{ м} \quad (1.1.13)$$

Волновое сопротивление контура составляет

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_{\Sigma}}{C}} = \sqrt{\frac{30 \cdot 10^{-6}}{5575 \cdot 10^{-6}}} = 0,073 \text{ Ом} \quad (1.1.14)$$

Активное сопротивление конденсатора:

$$R_C = Z_0 \operatorname{tg}(\delta) = 0,707 \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 1,41 \cdot 10^{-4} \text{ МОм} \quad (1.1.15)$$

где $tg(\delta)$ – тангенс угла потерь, $2 \cdot 10^{-4}$ [6]

Активное сопротивление соединительных проводов:

$$R_{\text{пр}} = \rho_{Cu} \frac{l_{\text{пр}} + l_{\text{прИТ}} + l_{\text{прК}}}{S_{\text{пр}}} = 1,72 \cdot 10^{-8} \frac{1,6 + 5,9 + 1,6}{4 \cdot 10^{-6}} = 39,1 \text{ мОм} \quad (1.1.16)$$

Полное сопротивление контура с лампами ИНП – 7/80:

$$\begin{aligned} R_0 &= R_C + R_{\text{пр}} = (1,41 \cdot 10^{-4} + 39,1 \cdot 10^{-3}) = \\ &= 39,24 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \end{aligned} \quad (1.1.17)$$

1.2. Определение максимального тока в лампе

Закон Кирхгофа для контура на рисунке 1.3:

$$E_{\text{сам}}(t) = U_c(t) + I(t) \cdot (R_0 + R_{\text{пл}}(t)) \quad (1.2.1)$$

Запасенный в конденсаторе заряд:

$$q(t) = C \cdot U_c(t) \quad (1.2.2)$$

Ток через конденсатор:

$$I(t) = C \cdot \frac{dU_c(t)}{dt} \quad (1.2.3)$$

Напряжение на конденсаторе:

$$U_c(t) = U_0 - \frac{1}{C} \int_0^t I(t) dt \quad (1.2.4)$$

Соотношение для индуктивности:

$$E_{\text{сам}}(t) = -L \frac{dI(t)}{dt} \quad (1.2.5)$$

Сопротивление лампы описывается формулой Гонза:

$$R_{\text{пл}}(t) = \frac{K_0}{\sqrt{|I(t)|}}, \text{ Ом.} \quad (1.2.6)$$

Далее была создана схема в *Simulink* с использованием библиотеки *Simscape*, представлен на рисунке 1.4

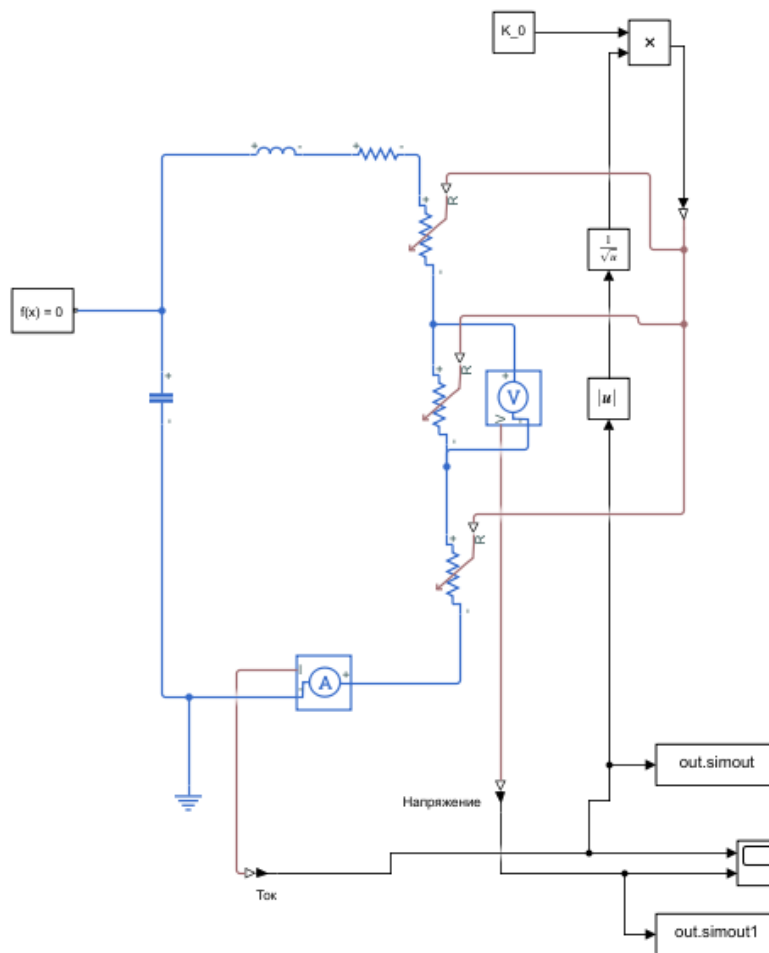


Рисунок 1.2.1 – Внешний вид схемы, собранной в *Simulink*

Пример результатов расчета представлен на рисунке 1.5.



Рисунок 1.2.2 – Пример результатов расчета лампы ИНП 7/80

Максимальное значение тока:

$$I_m = 378 \text{ А.}$$

Сопротивление лампы по (1.2.6):

$$R_{\text{л}} = \frac{K_0}{\sqrt{I_m}} = \frac{14,2}{\sqrt{378}} = 0,728 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление контура с лампой:

$$R_{\Sigma} = R_0 + 3R_{\text{л}} = 0,039 + 3 \cdot 0,728 = 2,23 \text{ Ом.} \quad (1.2.7)$$

Параметр затухания:

$$\gamma = \frac{R_{\Sigma}}{2Z_0} = \frac{1,91}{2 \cdot 0,073} = 15. \quad (1.2.8)$$

Максимальная электрическая мощность, развиваемая контуром:

$$P_{\text{эл}} = I_m^2 \cdot R_{\Sigma} = 378^2 \cdot 2,23 = 3,18 \cdot 10^5 \text{ Вт.} \quad (1.2.9)$$

Максимальная электрическая мощность, рассеиваемая в одной лампе:

$$P_{\text{л}} = I_m^2 \cdot R_{\text{л}} = 378^2 \cdot 0,728 = 1,04 \cdot 10^5 \text{ Вт.} \quad (1.2.10)$$

КПД контура:

$$\eta_{\text{пл}} = \frac{3R_{\text{л}}}{R_{\Sigma}} = \frac{3 \cdot 0,728}{2,23} = 0,98 \quad (1.2.11)$$

Для $\gamma > 1$ реализуется закритический режим затухания.

На рисунке 1.2.3 представлены зависимости силы тока и мощности от времени.

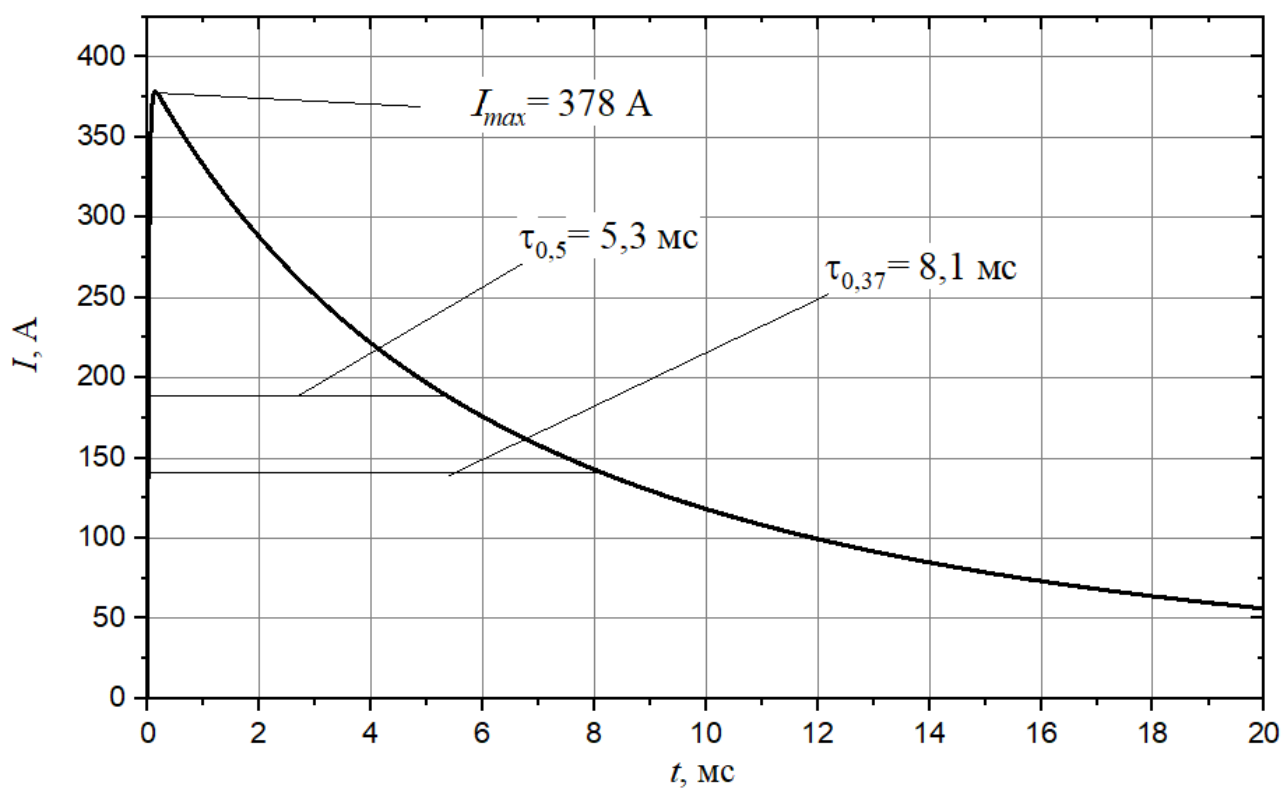


Рисунок 1.2.3 – Ток в лампе ИНП – 7/80 с учетом нелинейности сопротивления плазмы

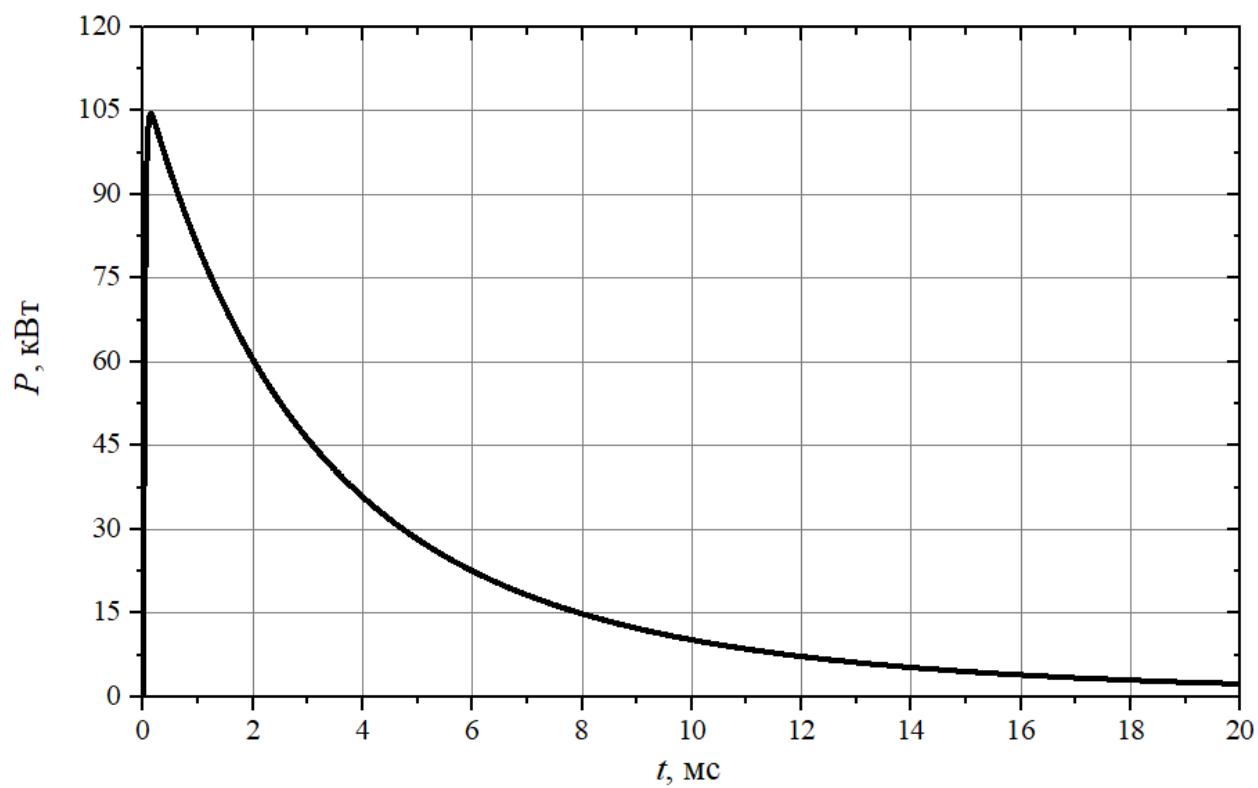


Рисунок 1.2.4 – Мощность выделенная на одной лампе ИНП – 7/80

Ток достигает максимума в момент времени $t_m = 0,14$ мс, максимальный ток разряда составил $I_{ml} = 378$ А и характерное время энерговклада в лампу $\tau_{0,5} = 5,3$ мс.

2. Расчет термодинамических параметров плазмы и излучательных характеристик импульсной ксеноновой лампы ИНП-7/80 в установке фотонного отжига.

2.1. Расчет времени заполнения лампы плазмой

Согласно эмпирической формуле С.И.Андреева, время заполнения лампы плазмой:

$$\tau_3 = 3 \cdot 10^3 \cdot d \cdot \sqrt{P} \cdot \left(\frac{U_0}{l}\right)^{-1.5} = 3 \cdot 10^3 \cdot 0,7 \cdot \sqrt{400} \cdot \left(\frac{850}{8}\right)^{-1.5} \approx 38,4 \text{ мкс} \quad (2.1.1)$$

Время заполнения лампы:

$$V = \frac{d}{\tau_3} = \frac{0,007}{38,4 \cdot 10^{-6}} \approx 183 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (2.1.2)$$

Так как максимум ток достигается при 138 мкс, то можно утверждать, что в лампе реализуется установившийся режим разряда, и в основной стадии процесса все сечение колбы заполнено плазмой.

2.2. Расчет температуры плазмы

Максимальная плотность тока в лампе:

$$j_{max} = \frac{I_m}{S_l} = \frac{378}{0,385} = 983 \frac{\text{А}}{\text{см}^2} \quad (2.2.1)$$

В установившемся режиме температура плазмы в максимуме тока составляет:

$$T_{пл} \approx 3,5 \cdot 10^3 \left(\frac{S_l}{p_0}\right)^{\frac{1}{16}} j_{max}^{0.25} = 3,5 \cdot 10^3 \left(\frac{0,385}{5,32 \cdot 10^4}\right)^{\frac{1}{16}} 983^{0.25} = 9,35 \cdot 10^3 \text{ К} = 0,81 \text{ эВ} \quad (2.2.2)$$

2.3. Расчет ионизационного состава плазмы

Расчет ионизационного состава и термодинамических характеристик плазмы проведен в предположении наличия в ней локального термодинамического равновесия. Ионизационный состав определяется из уравнения Саха.

Суммарное количество тяжелых частиц:

$$n_{\Sigma} \approx 3,3 \cdot 10^{16} \cdot p_0 = 3,3 \cdot 10^{16} \cdot 400 = 1,32 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \quad (2.3.1)$$

Степень ионизации α определяется из уравнения, следующего из уравнения Саха:

$$\alpha = -\frac{A}{2} + \sqrt{\frac{A^2}{4} + A}, \quad (2.3.2)$$

где

$$\begin{aligned} A &= 4,9 \cdot 10^{15} \frac{\sum_i T_i^{\frac{3}{2}}}{\sum_a n_{\Sigma}} e^{-\frac{I_0 - \Delta I_0}{kT}} = 4,9 \cdot 10^{15} \frac{4 \cdot (9,35 \cdot 10^3)^{\frac{3}{2}}}{1 \cdot 1,32 \cdot 10^{19}} e^{-\frac{12,16 - \Delta I_0}{0,81}} = \\ &= 1,34 \cdot 10^3 \cdot e^{-\frac{12,16 - \Delta I_0}{0,81}} \end{aligned} \quad (2.3.3)$$

Так как величина снижения потенциала ионизации ΔI_0 не известна, решение было осуществлено методом последовательных итераций в среде *MATLAB*, программный код которой представлен в приложении.

На первом шаге $\Delta I_{01} = 0$. Тогда $A = 0,03$.

$$\alpha = -\frac{3,78 \cdot 10^3}{2} + \sqrt{\frac{(3,78 \cdot 10^3)^2}{4} + 3,78 \cdot 10^3} = 0,0193 \quad (2.3.4)$$

$$n_e = \alpha n_{\Sigma} = 0,0193 \cdot 1,32 \cdot 10^{19} = 2,55 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3} \quad (2.3.5)$$

$$\Delta I_{02} \approx 2,1 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{n_e}{T}\right)^{\frac{1}{2}} = 2,1 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{2,55 \cdot 10^{17}}{1,27 \cdot 10^4}\right)^{\frac{1}{2}} \approx 0,11 \text{ эВ} \quad (2.3.6)$$

Расчет проводился пока значения степени ионизации, концентрации электронов и снижение потенциала ионизации на последнем и предпоследнем шагах стали различаться менее чем на 1 %. Окончательно принимаем $\alpha = 0,021$, $n_e = 2,72 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\Delta I_0 = 0,113 \text{ эВ}$.

2.4. Расчет внутренней энергии плазмы

При расчете внутренней энергии плазмы учитываются энергия поступательного движения частиц и энергия ионизации. Внутренняя энергия, приходящая на одну частицу:

$$\begin{aligned}\varepsilon &\approx \frac{3}{2}kT(1 + \alpha) + (I_0 - \Delta I_0) \cdot \alpha = \\ &= \frac{3}{2} \cdot 0,81 \cdot (1 + 0,021) + (12,16 - 0,113) \cdot 0,021 = 1,61 \frac{\text{эВ}}{\text{част}}\end{aligned}\quad (2.4.1)$$

Учет энергии электронного возбуждения приведет к увеличению внутренней энергии на 10%:

$$\varepsilon \approx 1,1 \cdot 1,61 = 1,77 \frac{\text{эВ}}{\text{част}}\quad (2.4.2)$$

Удельная внутренняя энергия плазмы:

$$E_{\text{вн.уд}} = \varepsilon \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{M_0} = 1,77 \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{2,2 \cdot 10^{-25}} = 1,17 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\quad (2.4.3)$$

Масса плазмы в межэлектродном объеме лампы:

$$m_{\text{пл}} = n_{\Sigma} S_{\text{л}} l M_0 = 1,32 \cdot 10^{19} \cdot 0,385 \cdot 8 \cdot 2,2 \cdot 10^{-25} = 8,94 \cdot 10^{-6} \text{ кг}\quad (2.4.4)$$

Полная внутренняя энергия плазмы:

$$E_{\text{вн}} = E_{\text{вн.уд}} m_{\text{пл}} = 8,94 \cdot 10^6 \cdot 1,17 \cdot 10^{-6} \approx 10,45 \text{ Дж}\quad (2.4.5)$$

2.5. Расчет скорости звука и давления в плазме

Эффективный показатель адиабаты плазмы:

$$\gamma = 1 + (1 + \alpha) \frac{kT}{\varepsilon} = 1 + (1 + 0,021) \frac{0,81}{1,61} \approx 1,51\quad (2.5.1)$$

Скорость звука в плазме:

$$c_{\text{зв}} = \sqrt{\gamma(\gamma - 1)E_{\text{вн.уд}}} = \sqrt{1,51 \cdot (1,51 - 1) \cdot 1,17 \cdot 10^6} \approx 951 \frac{\text{м}}{\text{с}}\quad (2.5.2)$$

Скорость звука определяет характерное время выравнивания газодинамических параметров плазмы по объему:

$$\tau_{\text{гд}} = \frac{d}{c_{\text{зв}}} = \frac{7 \cdot 10^{-3}}{951} = 7,36 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 7,36 \text{ мкс} \quad (2.5.3)$$

Это время более, чем в 18 раза меньше характерного времени разряда в лампе – τ_m (140 мкс), поэтому можно считать давление по объему плазмы выровненным.

Давление в плазме:

$$p \approx 4,55 \cdot 10^{-7} p_0 T(1 + \alpha) = 4,55 \cdot 10^{-7} \cdot 400 \cdot 9,35 \cdot 10^3 \cdot (1 + 0,02) \approx 17 \text{ атм} \quad (2.5.4)$$

Расчетное давление не превышает разрывного давления 192 атм.

2.6. Расчет проводимости плазмы

Расчет проводимости выполнен в рамках нескольких приближений.

$$\Lambda = 1,24 \cdot 10^4 \cdot \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{n_e}} = 1,24 \cdot 10^4 \cdot \frac{(9,35 \cdot 10^3)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2,72 \cdot 10^{17}}} = 21,5 \quad (2.6.1)$$

Кулоновский логарифм:

$$\ln \Lambda = 3,07$$

Тогда спитцеровская проводимость для однократно ионизованной плазмы:

$$\sigma_{\text{сп}} = 1,54 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\ln \Lambda} = 1,54 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{(9,35 \cdot 10^3)^{\frac{3}{2}}}{3,07} = 45,4 \text{ (Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}) \quad (2.6.2)$$

Данное значение проводимости считается завышенным. В [7] эффекты неидеальности плазмы предлагается учитывать с помощью эффективного заряда ионов:

$$Z_{\text{эфф}} = 1 + 53 \cdot \frac{n_e^{\frac{1}{3}}}{T^2} = 1 + 53 \cdot \frac{(2,72 \cdot 10^{17})^{\frac{1}{3}}}{(9,35 \cdot 10^3)^2} = 1,39 \quad (2.6.3)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{сп.эфф.}} &= 1,54 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\ln \Lambda \cdot Z_{\text{эфф}}} = 1,54 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{(9,35 \cdot 10^3)^{\frac{3}{2}}}{3,07 \cdot 1,39} = \\ &= 32,6 \text{ (Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}) \end{aligned} \quad (2.6.4)$$

2.7. Расчет излучательных характеристик

Для расчета излучательных характеристик ксеноновой лампы применялась теория Бибермана – Нормана – Андреева, которая учитывает взаимодействие атомов, ионов и электронов между собой. Взаимодействие приводит к тому, что высшие дискретные уровни не реализуются (это соображение, как известно, используется для обрезания статистической суммы). Кроме того, самые верхние реализующиеся уровни могут, вообще говоря, вследствие уширения перекрыться между собой. Эти два явления изменяют схему уровней атома: происходит фактическое снижение потенциала ионизации и, кроме того, слияние верхних уровней приводит к кажущемуся снижению. Граница сплошного спектра смещается в сторону меньших частот. В этом случае спектральный диапазон разбивается на три области:

Первая расчетная спектральная область приходится на энергию квантов

$$E_{\text{опт}} - h\Delta\nu < h\nu \leq h\nu_{\text{гр}} - h\Delta\nu$$

где $E_{\text{опт}}$ – ширина энергетического интервала вблизи границы ионизации, в котором из-за неидеальности плазмы верхние возбужденные уровни не реализуются; $h\Delta\nu$ – сдвиг порога фотоионизации; $h\nu_{\text{гр}} = 2,6$ – граничная энергия для ксенона (энергия самого глубокого уровня, дающего вклад в фотоионизацию и учитываемого интегрально).

Величина $E_{\text{опт}}$ определяется параметром неидеальности плазмы, который в нашем случае составляет:

$$\gamma \approx 1,66 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{n_e^{\frac{1}{3}}}{T_{\text{пл}}} = 1,66 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{(2,72 \cdot 10^{17})^{\frac{1}{3}}}{9,35 \cdot 10^3} = 0,115 \quad (2.7.1)$$

При таком значении параметра из таблицы 1 [1],

Таблица 1 – Экспериментальная зависимость эффективной границы «срезания» верхних уровней $E_{\text{опт}}$ от параметра нелинейности

γ	0,12	0,125	0,130	0,135	0,140	0,15	0,16	0,17	0,18	0,2	0,25
$E_{\text{опт}}$	0	0,5	1,0	1,25	1,4	1,65	1,8	1,94	2,0	2,12	2,17

Используя линейную интерполяцию, находим, что $E_{\text{опт}} \approx 0$.

Фактор Гаунта для свободно-свободных переходов: $g_{ff} = 1,2$.

Энергетический сдвиг порога фотоионизации $h\Delta\nu$ рассчитывается по формуле Инглиса-Теллера и для плазмы в рассматриваемой лампе составляет:

$$h\Delta\nu \approx 10^{-5} \cdot n_e^{0,267} = 10^{-5} \cdot 2,72 \cdot 10^{17})^{0,267} \approx 0,452 \text{ эВ.} \quad (2.7.2)$$

Таким образом, первая расчетная область лежит в диапазоне энергии квантов:

$$1,13 < h\nu \leq 2,148 \text{ эВ}$$

или длин волн:

$$577 \leq \lambda < 1100 \text{ нм}$$

В этой области коэффициент непрерывного поглощения плазмы рассчитывают по формуле:

$$k'_\nu = 2 \cdot 10^{-37} \frac{n_e^2}{\sqrt{kT} \cdot (h\nu)^2} \left(e^{\frac{h\nu + h\Delta\nu - \Delta I}{kT}} + 1,2 \right) f(\gamma) \left(1 - e^{-\frac{h\nu}{kT}} \right), \quad (2.7.3)$$

в которой kT , $h\nu$, $h\Delta\nu$ и ΔI выражены в эВ; n_e в см^{-3} , а $f(\gamma)$ - функция, учитывающая эффекты неидеальности в плазме, имеет вид:

$$f(\gamma) = \frac{e^{\frac{h\nu + h\Delta\nu}{kT}} - e^{\frac{E_{\text{опт}}}{kT}} + g_{ff}}{e^{\frac{h\nu + h\Delta\nu}{kT}} - 1 + g_{ff}} \quad (2.7.4)$$

Вторая расчетная область приходится на энергию квантов

$$2,148 < h\nu \leq 6,2 \text{ эВ}$$

или на диапазон длин волн

$$200 \leq \lambda < 577 \text{ нм}$$

В этой области энергий квантов расчет коэффициентов поглощения ведется по формуле:

$$k''_\nu = 2 \cdot 10^{-37} \frac{n_e^2}{\sqrt{kT} \cdot (h\nu)^2} \cdot \left(e^{\frac{2,6 - \Delta I}{kT}} + 1,2 \right) \cdot f(\gamma) \cdot \left(1 - e^{-\frac{h\nu}{kT}} \right), \quad (2.7.5)$$

где функция $f(\gamma)$ имеет вид:

$$f(\gamma) = \frac{e^{\frac{2,6}{kT}} - e^{\frac{E_{\text{опт}}}{kT}} + g_{ff}}{e^{\frac{2,6}{kT}} - 1 + g_{ff}} \quad (2.7.6)$$

Третья расчетная область охватывает коротковолновый УФ диапазон с энергией квантов вплоть до энергии, соответствующей потенциалу ионизации атома ксенона

$$6,2 < h\nu \leq 12,16 \text{ эВ}$$

$$102 \leq \lambda < 200 \text{ нм}$$

В этой области энергий квантов расчет коэффициентов поглощения ксеноновой плазмы ведется по формуле:

$$k_v''' = k_{6,2}'' \frac{6,2^3}{(h\nu)^3} \cdot \frac{\left(1 - e^{-\frac{h\nu}{kT}}\right)}{\left(1 - e^{-\frac{6,2}{kT}}\right)}, \quad (2.7.8)$$

Полученная расчетная зависимость коэффициентов поглощения ксеноновой плазмы представлена на рисунке 2.7.1.

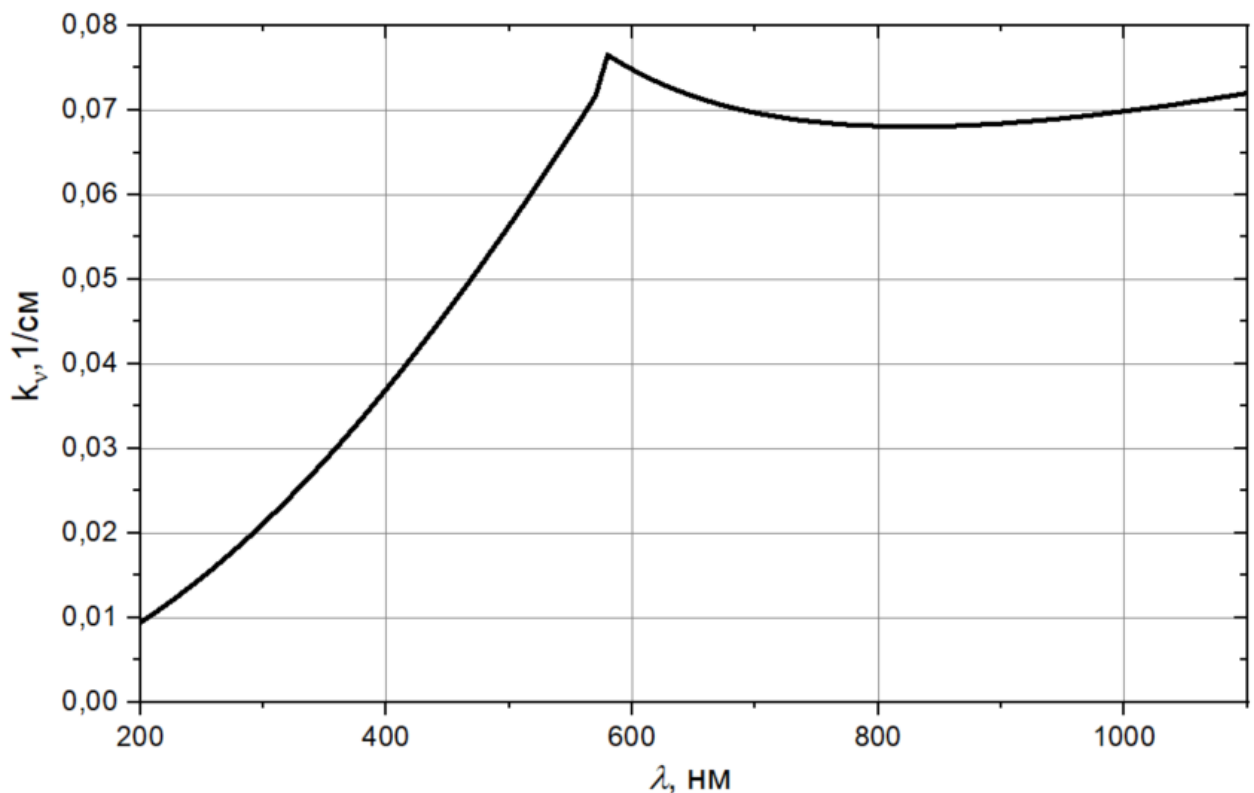


Рисунок 2.7.1 - Коэффициент поглощения ксеноновой лампы

Оптическая толщина лампы:

$$\tau_{\lambda} = k_{\lambda} d \quad (2.7.9)$$

Спектральный поток трубчатой ксеноновой лампы:

$$P_{\lambda} = 0,9 K_{\lambda_{\text{ст}}} \frac{11,9}{\left(\frac{\lambda}{1000}\right)^5} \frac{\pi^2 d l}{\exp\left(\frac{1,44 \cdot 10^7}{T \lambda}\right) - 1} (1 - \exp(-\alpha \tau_{\lambda})), \frac{\text{Вт}}{\text{нм}} \quad (2.7.10)$$

В расчетах коэффициент пропускания излучения стенки колбы $K_{\lambda_{\text{ст}}}$ принимается равным 0,92 для длин волн $\lambda > 270$ нм; при $\lambda = 270$ нм $K_{\lambda_{\text{ст}}} = 0,9$; при $\lambda = 230$ нм $K_{\lambda_{\text{ст}}} = 0,65$; для $\lambda < 190$ нм $K_{\lambda_{\text{ст}}} = 0$. Коэффициент α равен 1, если $\tau_{\lambda} < 0,5$ и равен 0,9 при $\tau_{\lambda} > 0,5$.

Спектральная сила излучения в предположении изотропного распределения яркости излучения (рисунок 2.7.2):

$$I_{\lambda} = \frac{P_{\lambda}}{\pi^2}, \frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{нм}} \quad (2.7.11)$$

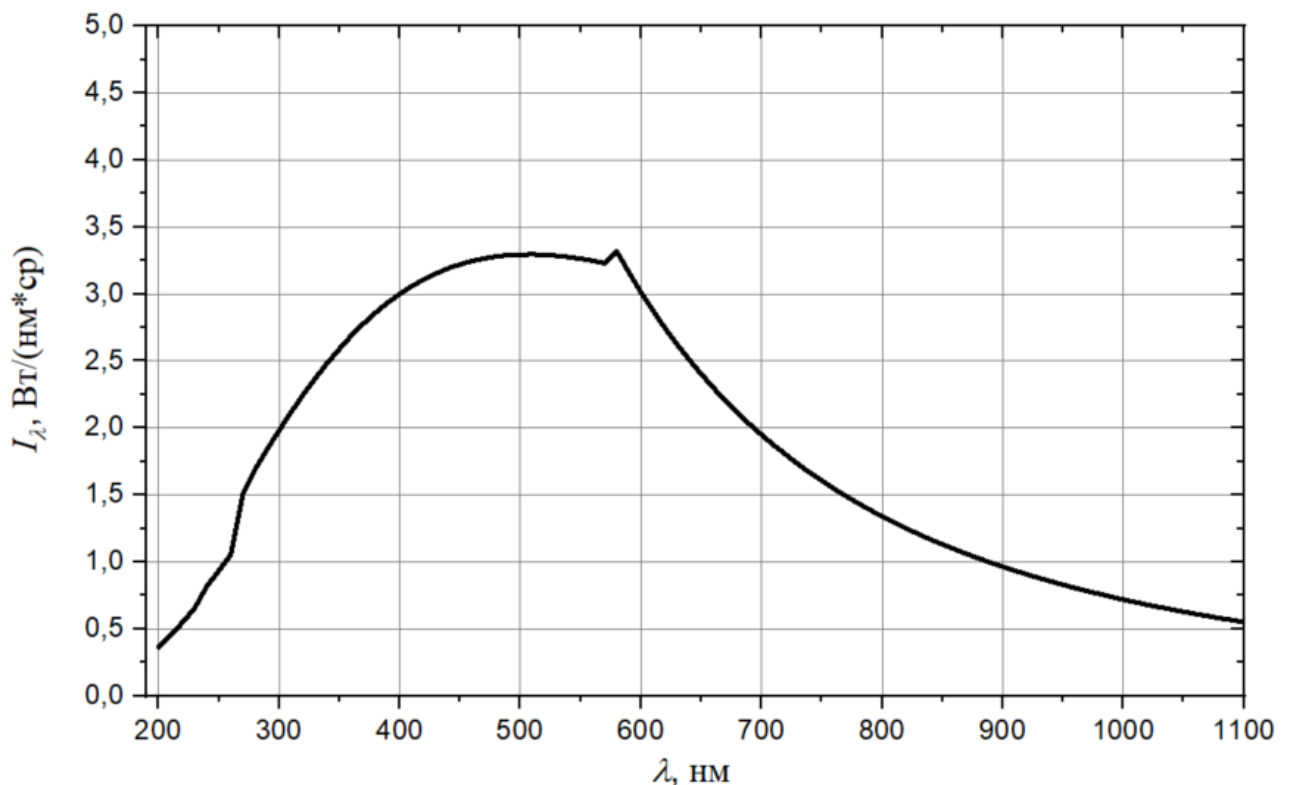


Рисунок 2.7.2 – Зависимость спектральная сила излучения ксеноновой лампы от длины волны

Максимальная спектральная сила излучения лампы $I_{\lambda max} = 3,32 \text{ Вт/(ср·нм)}$,
 эффективная полуширина $\Delta\lambda_{0,5}=463 \text{ нм}$.

Спектральная яркость лампы:

$$B_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}}{dl}, \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{нм}}. \quad (2.7.12)$$

Яркостная температура лампы:

$$T_{\lambda} = \frac{1,44 \cdot 10^4}{\left(\frac{\lambda}{1000}\right) \ln \left(\frac{11,9}{B_{\lambda} \left(\frac{\lambda}{1000}\right)^5} + 1 \right)}, \text{ К.} \quad (2.7.13)$$

Поверхностная плотность электрической мощности лампы:

$$P_s = \frac{\eta_1 \eta_{\text{пл}} W_0}{\pi dl \tau_{0,5}} = \frac{2,01 \cdot 10^3}{\pi \cdot 0,7 \cdot 8 \cdot 0,006} = 1,91 \cdot 10^4 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}. \quad (2.7.14)$$

Зависимость яркостной температуры от длины волны представлена на рисунке 2.7.3.

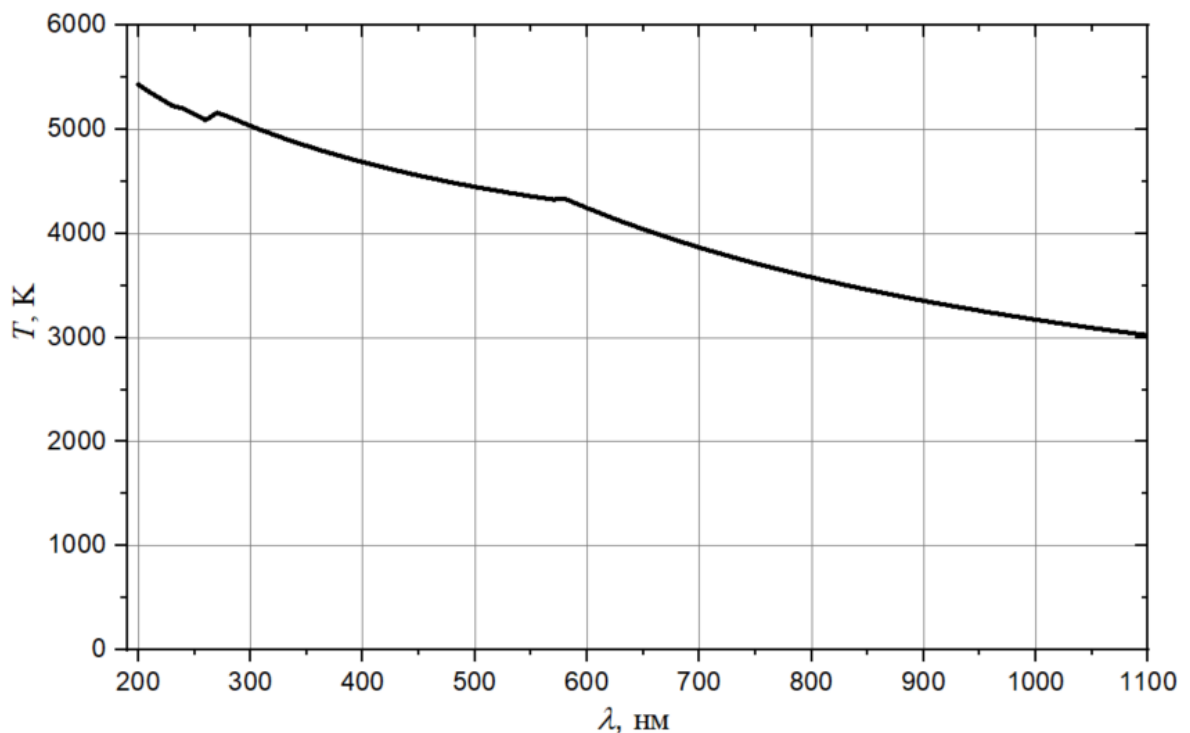


Рисунок 2.7.3 – Яркостная температура ксеноновой лампы

Интегральная по спектру сила излучения лампы:

$$I \approx \Delta\lambda_{0,5} \cdot I_{\lambda max} = 463 \cdot 3,44 = 1,59 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}. \quad (2.7.15)$$

Расчетно-теоретическая оценка пиковой мощности излучения:

$$P_{изл} \approx \pi^2 \cdot I = \pi^2 \cdot 1,59 \cdot 10^3 = 1,57 \cdot 10^4 \text{ Вт} \quad (2.7.16)$$

Принимая эффективную длительность импульса излучения равной характерному времени энерговклада, можно оценить энергию и интегральный КПД излучения лампы:

$$E_{изл} \approx P_{изл} \cdot \tau_{0,37} \cdot 3 = 1,57 \cdot 10^4 \cdot 8,3 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \approx 392,2 \text{ Дж}. \quad (2.7.17)$$

$$\eta_{изл} = \frac{E_{изл}}{W_0} = \frac{392,2}{2014} = 0,195 \quad (2.7.18)$$

2.8. Оценка основных эксплуатационных характеристик лампы

Предельная электрическая энергия импульса:

$$\begin{aligned} W_{пред} &\approx 13,5 \cdot 10^3 dl \sqrt{\tau_{0,37}} = 13,5 \cdot 10^3 \cdot 0,7 \cdot 8 \cdot \sqrt{8,3 \cdot 10^{-3}} \approx \\ &\approx 6,88 \cdot 10^3 \text{ Дж} \end{aligned} \quad (2.8.1)$$

Фактор нагрузки:

$$\beta = \frac{W_0}{W_{пред}} = \frac{2014}{6,88 \cdot 10^3} = 0,29 \quad (2.8.2)$$

Максимальное число импульсов, которое лампа может выдержать при такой нагрузке:

$$N_{max} \approx \beta^{-8,5} = 0,29^{-8,5} \approx 3,46 \cdot 10^4 \text{ имп} \quad (2.8.3)$$

Максимальная частота следования импульсов при работе в импульсно-периодическом режиме:

- в условиях естественного воздушного охлаждения:

$$f_{max} = \frac{P_{s \text{ пр}} \pi d_{нар} l}{W_0} = \frac{15 \cdot \pi \cdot 0,9 \cdot 8}{2014} \approx 0,17 \text{ Гц} \quad (2.8.4)$$

- в условиях принудительного воздушного охлаждения:

$$f_{max} = \frac{P_{s \text{ пр}} \pi d_{нар} l}{W_0} = \frac{30 \cdot \pi \cdot 0,9 \cdot 8}{2014} \approx 0,33 \text{ Гц} \quad (2.8.5)$$

- в условиях принудительного водяного охлаждения:

$$f_{max} = \frac{P_{s\text{ пр}} \pi d_{\text{нар}} l}{W_0} = \frac{200 \cdot \pi \cdot 0,9 \cdot 8}{2014} \approx 2,25 \text{ Гц} \quad (2.8.6)$$

2.9. Оценка теплового режима колбы лампы

В предельных энерго-мощностных режимах температура наружной стенки колбы ограничена при воздушном охлаждении температурой начала резкой рекристаллизации кварца $T_{\text{мах нар}}=1073 \text{ К}$, при водяном $T_{\text{мах нар}}=363 \text{ К}$.

В установившемся тепловом режиме лампы максимальный температурный перепад между наружной и внутренней поверхностью стенки колбы:

$$\Delta T_{\text{ст}} \approx 5P_{s\text{ пр}} = 5 \cdot 15 = 75 \text{ К}. \quad (2.9.1)$$

$$\Delta T_{\text{ст}} \approx 5P_{s\text{ пр}} = 5 \cdot 30 = 150 \text{ К}. \quad (2.9.2)$$

$$\Delta T_{\text{ст}} \approx 5P_{s\text{ пр}} = 5 \cdot 200 = 1000 \text{ К}. \quad (2.9.3)$$

Средняя по времени рабочего цикла лампы температура внутренней стенки колбы:

$$T_{\text{вн}} \approx T_{\text{мах нар}} + \Delta T_{\text{ст}} = 1073 + 75 = 1148 \text{ К}. \quad (2.9.4)$$

$$T_{\text{вн}} \approx T_{\text{мах нар}} + \Delta T_{\text{ст}} = 1073 + 150 = 1223 \text{ К}. \quad (2.9.5)$$

$$T_{\text{вн}} \approx T_{\text{мах нар}} + \Delta T_{\text{ст}} = 363 + 1000 = 1363 \text{ К}. \quad (2.9.6)$$

3. Результаты расчетов для ламп ИФП 2000

Расчет для лампы ИФП-2000 проводился аналогично расчету для лампы ИНП-7/80 при тех же параметрах контура.

Схема контура для лампы, созданная в *Simulink* с использованием библиотеки *Simscape*, представлен на рисунке 3.1

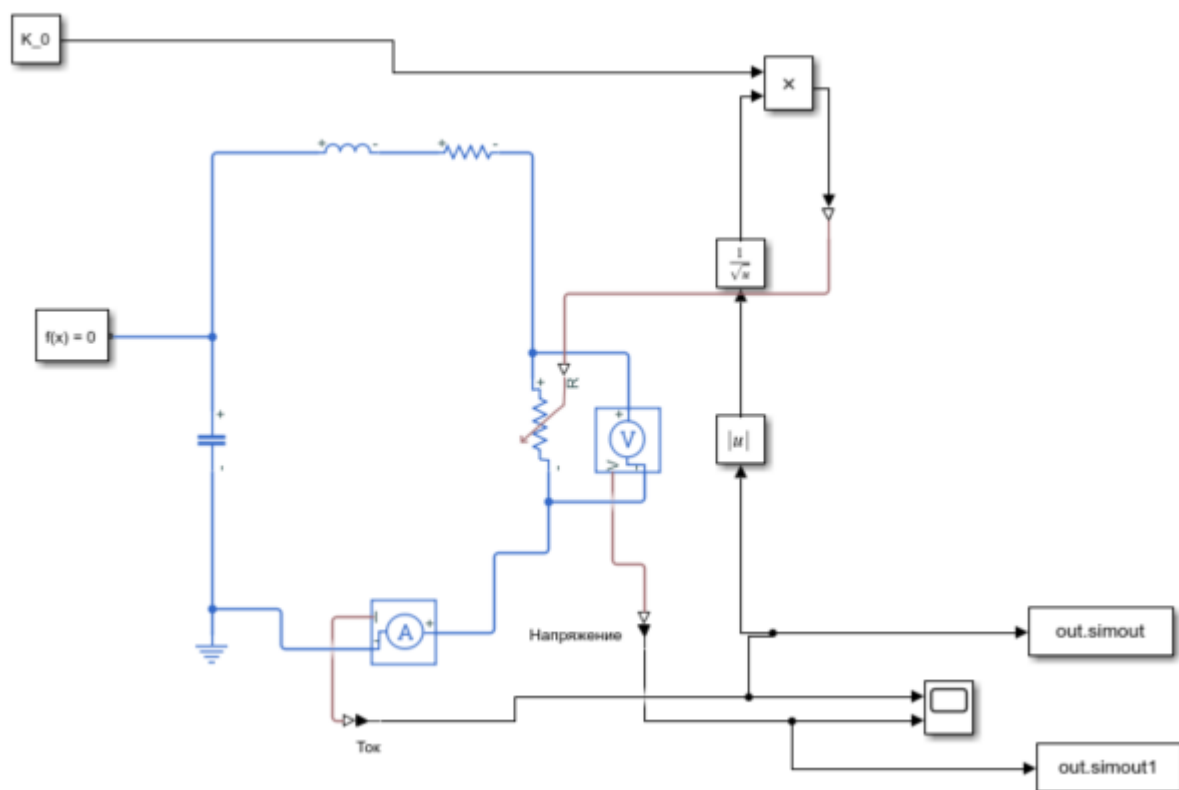


Рисунок 3.1 – Внешний вид схемы, собранной в *Simulink*

Пример результатов расчета представлен на рисунке 3.2.

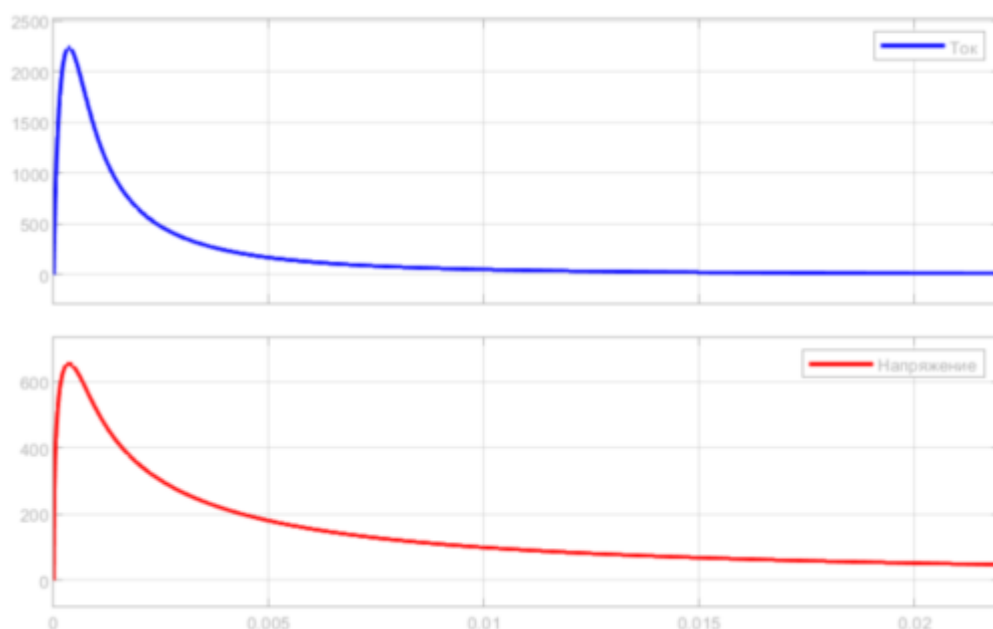


Рисунок 3.2 – Пример результатов расчета лампы ИФП 2000

На рисунке 3.3 и 3.4 представлены зависимости силы тока и мощности от времени.

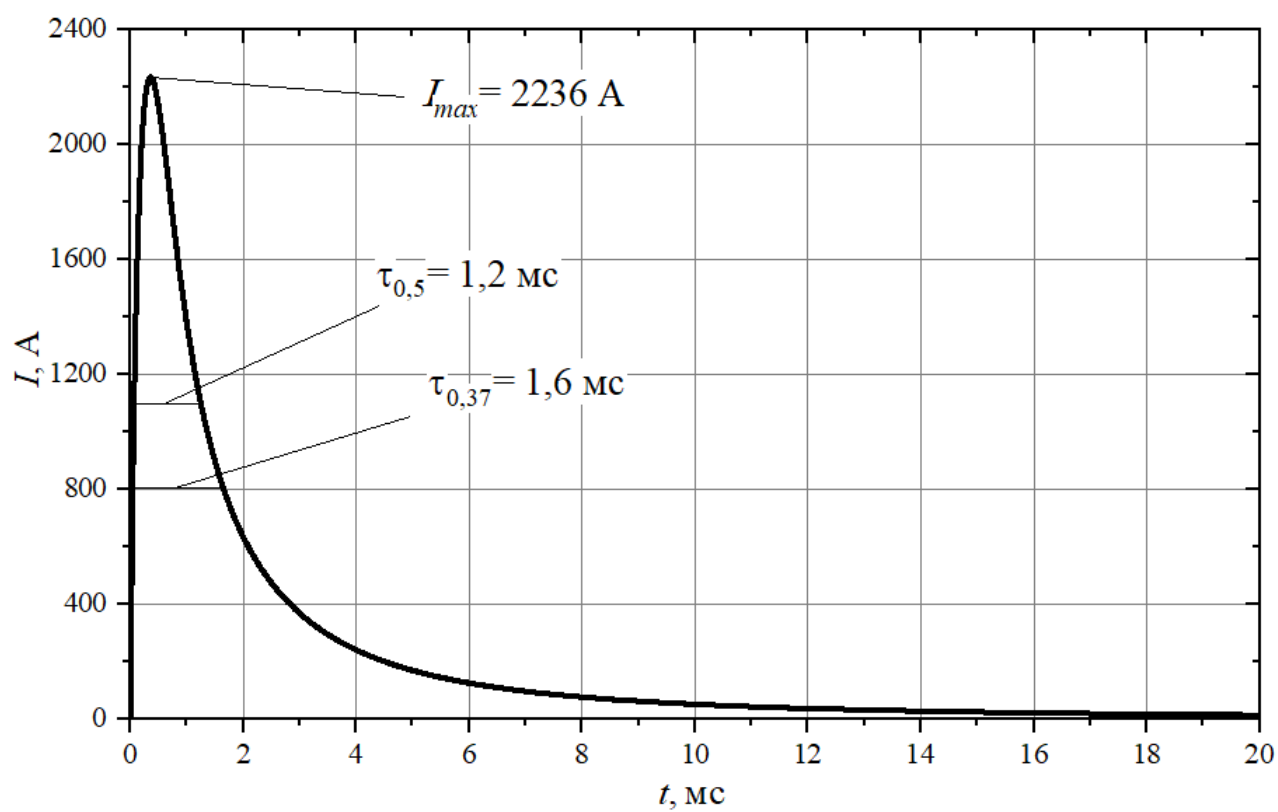


Рисунок 3.3 – Ток в лампе ИНП – 7/80 с учетом нелинейности сопротивления плазмы

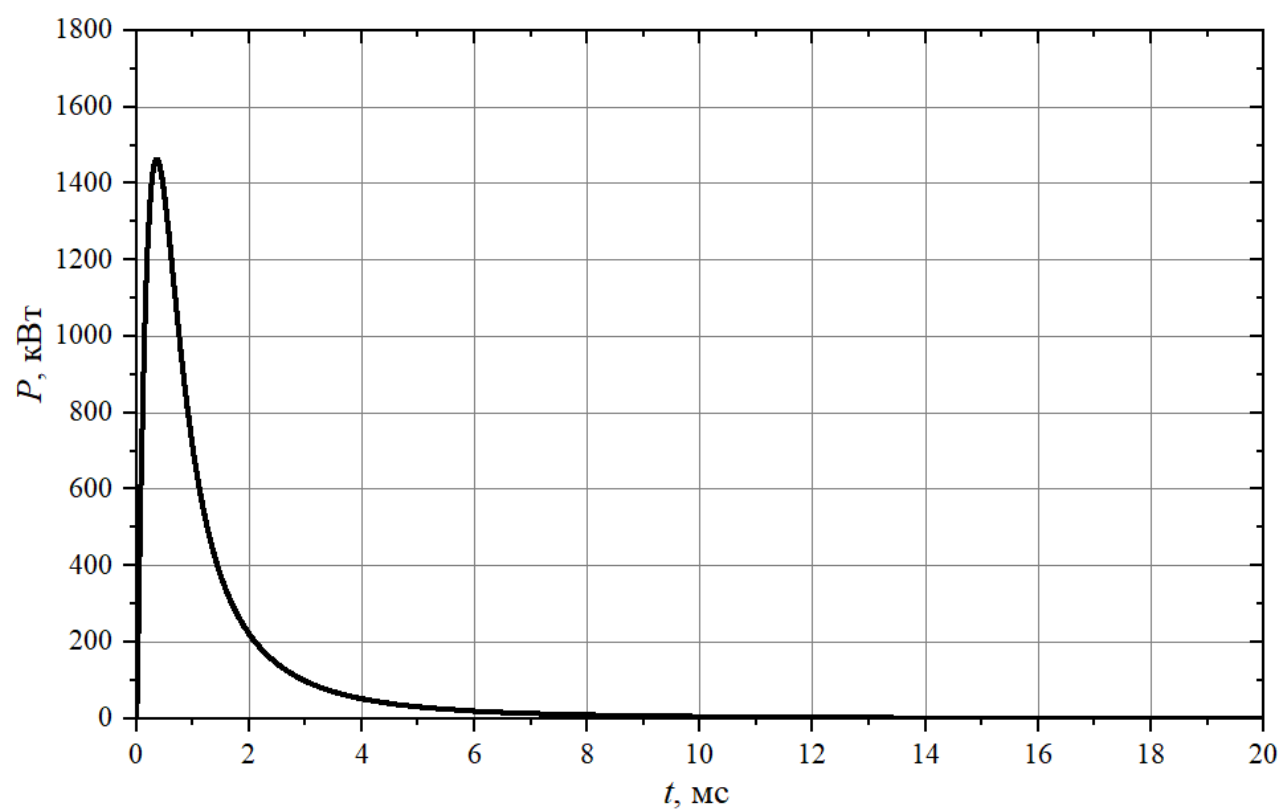


Рисунок 3.4 – Мощность выделенная на одной лампе ИНП – 7/80

3.1. Параметры электротехнического контура лампы ИФП 2000

Результаты расчета электротехнического контура лампы ИФП 2000 таблице 2.

Таблица 2 – Параметры электротехнического контура ламп ИФП 2000 и ИНП – 7/80

Параметр	ИНП-7/80	ИФП 2000
K_0	14,176	13,84
$W_0, Дж$	2014	
$L_\Sigma, мкГ$	30	30
$Z_0, Ом$	0,073	0,073
$R_0, мОм$	39,24	39,24
$R_L, Ом$	0,729	0,29
$R_\Sigma, Ом$	2,23	0,332
γ	15,2	4,13
$\eta_{пл}$	0,982	0,882
$t_m, мкс$	138,9	358
$I_m, А$	378	2236
$P_{эл}, 10^5 Вт$	3,18	16,6
$P_L, 10^5 Вт$	1,04	14,5

Графики тока и электрической мощности для ламп ИНП-7/80 и ИФП 2000 приведены на рисунках 3.1.1 и 3.1.2 соответственно.

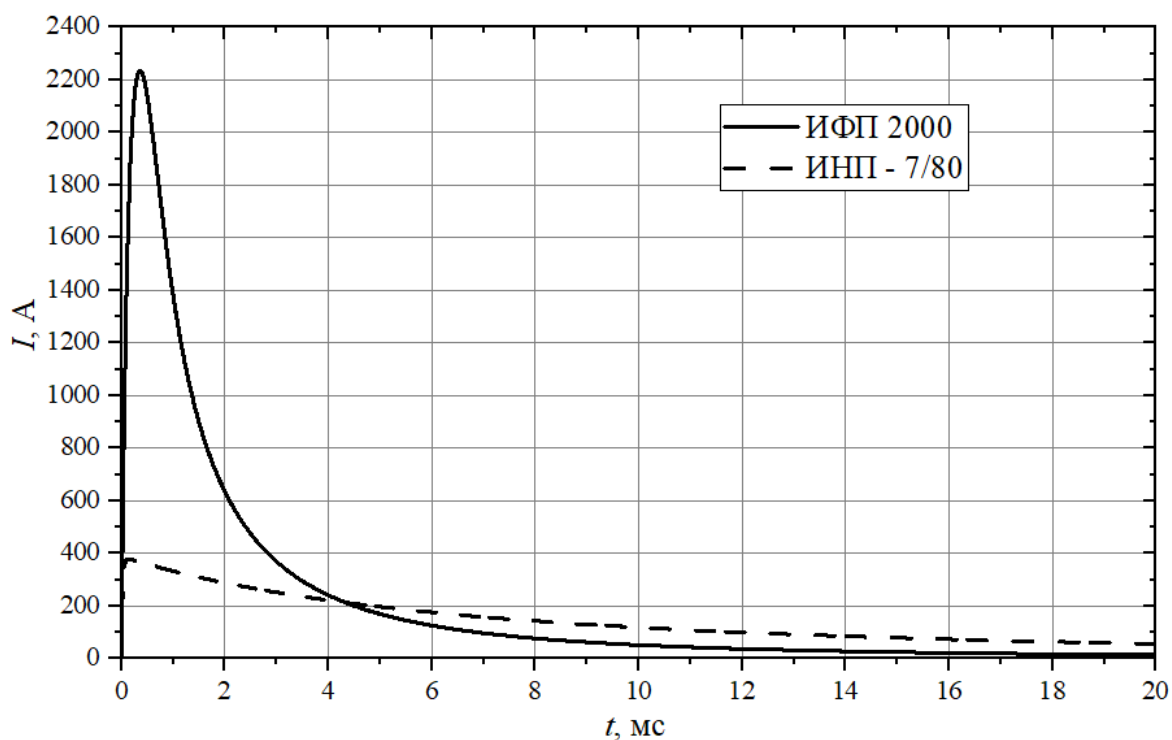


Рисунок 3.1.1 – Разрядный ток

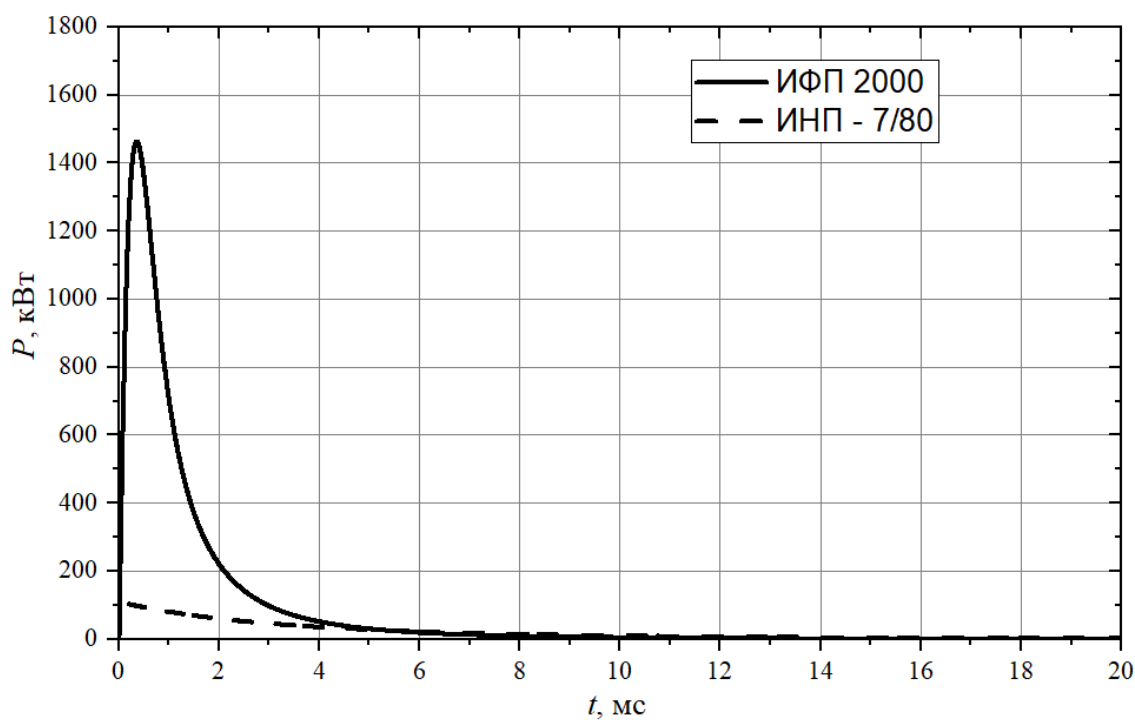


Рисунок 3.1.2 – Электрическая мощность, рассеиваемая на лампе

3.2. Расчет термодинамических параметров плазмы ламп ИМП-7/80 и ИФП 2000

Результаты расчета термодинамических параметров плазмы ламп ИМП-7/80 и ИФП 2000 приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Термодинамические параметры плазмы ламп ИНП-7/80 и ИФП 2000

Параметр	ИНП-7/80	ИФП 2000
t_m , мкс	138,9	358
$\tau_{зап}$, мкс	38	108
$j_m, 10^3 \frac{A}{cm^2}$	0,983	2,35
$T_{пл}$, КК	9,352	12,53
kT , эВ	0,81	1,08
$n_{\Sigma}, 10^{19} cm^{-3}$	1,32	
α	0,02	0,19
$n_e, 10^{18} cm^{-3}$	0,27	1,9
ΔI_0 , эВ	0,11	0,26
$m_{пл}$, мг	8,94	26,91
$E_{вн}$, Дж	10,44	86,23
γ	1,51	1,29
$c_{зв}, 10^3 \frac{m}{c}$	0,951	1,1
p , МПа	1,67	1,38
$\sigma_{сп}, Om^{-1} \cdot cm^{-1}$	32,6	60,1

3.3. Расчет спектральных характеристик ламп ИНП-7/80 и ИФП 2000

Результаты расчетов спектральных характеристик ламп ИНП-7/80 и ИФП 2000 по эмпирическим коэффициентам поглощения плазмы приведены в таблице 4 и 5 соответственно.

Таблица 4 – Результаты расчетов спектральных характеристик лампы ИНП-7/80

$\lambda, \text{нм}$	190	230	270	300	350	430	555	700	850	1000	1100
$k'_\lambda, \text{см}^{-1}$	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
τ'_λ	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
$P_\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{нм}}$	0	6,75	15,5	20,5	26,8	32,6	33,6	19,3	11,2	7,11	5,45
$I_\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{нм}}$	0	0,68	1,57	2,1	2,7	3,3	3,4	1,95	1,13	0,72	0,55
$\frac{B_\lambda, \text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{нм}}$	0	0,12	0,28	0,37	0,48	0,59	0,61	0,35	0,2	0,13	0,09
$T_\lambda, \text{КК}$	0	5,25	5,18	5,06	4,87	4,63	4,38	3,87	3,46	3,17	3,02

Таблица 5 – Результаты расчетов спектральных характеристик лампы ИФП 2000

$\lambda, \text{нм}$	190	230	270	300	350	430	555	700	850	1000	1100
$k'_\lambda, \text{см}^{-1}$	0,08	0,12	0,17	0,21	0,28	0,41	0,65	0,95	0,75	0,58	0,46
τ'_λ	0,09	0,14	0,19	0,23	0,31	0,45	0,71	1,05	0,83	0,63	0,51
$P_\lambda, \frac{\text{кВт}}{\text{нм}}$	0	1,35	2,36	2,63	2,76	2,56	1,80	1,21	0,58	0,28	0,17
$I_\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{ср} \cdot \text{нм}}$	0	136	238	267	279	260	182	123	58,5	28,6	17,5
$\frac{B_\lambda, \text{Вт}}{\text{см}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{нм}}$	0	9,54	16,7	18,6	19,5	18,2	12,7	8,61	4,09	1,99	1,22
$T_\lambda, \text{КК}$	0	8,27	8,58	8,61	8,64	8,77	8,86	9,26	8,38	7,42	6,71

Графики спектральной силы излучения и яркостной температуры для ламп ИНП-7/80 и ИФП 2000 приведены на рисунках 3.3.1 и 3.3.2 соответственно.

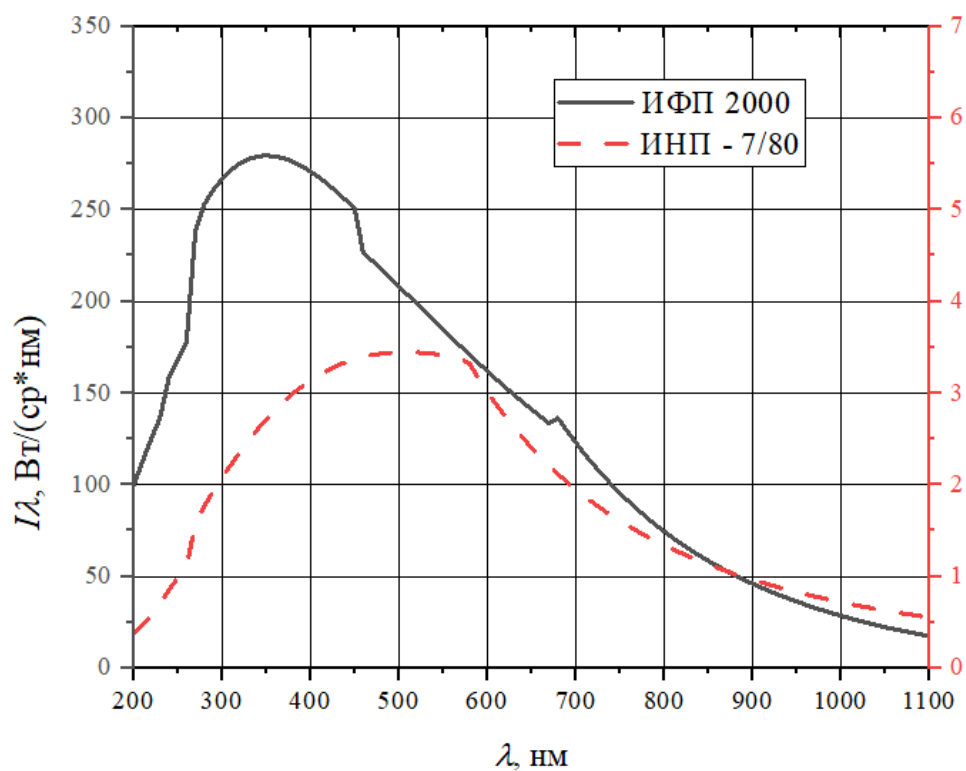


Рисунок 3.3.1 – Спектральная сила излучения ламп ИМП-7/80 и ИФП 2000

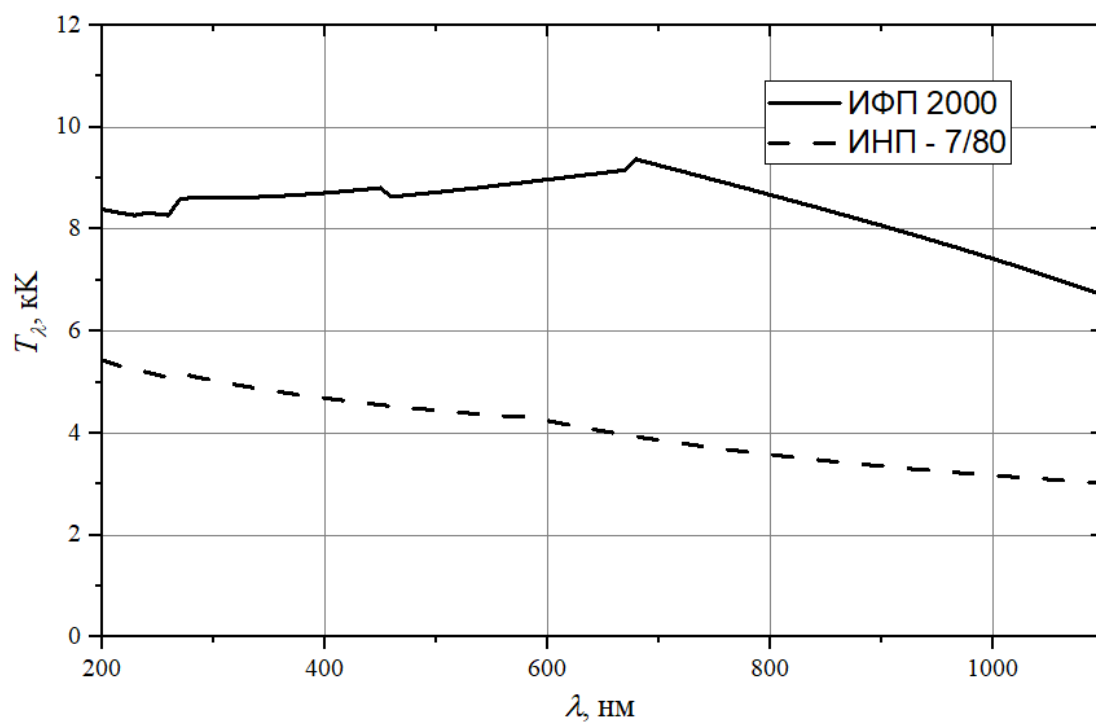


Рисунок 3.3.2 – Яркостная температура ламп ИМП-7/80 и ИФП 2000

Интегральная сила, мощность и КПД излучения ламп по спектру представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты расчетов интегральной силы, мощности и мощностного КПД излучения ламп ИНП-7/80 и ИФП 2000 по спектру

Параметр	ИНП-7/80	ИНП-5/80
$I_{\lambda 1}, \frac{\text{кВт}}{\text{ср}}$	1,58	117
$P_{\lambda 1}, \text{кВт}$	15,6	1164
$\eta_{\text{изл1}}$	0,19	0,694

3.4. Оценка основных эксплуатационных характеристик импульсных ламп ИНП-7/80 и ИФП 2000

Результаты оценочных расчетов основных эксплуатационных характеристик ламп ИНП-7/80 и ИФП 2000 представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты оценочных расчетов основных эксплуатационных характеристик ламп ИНП-5/80 и ИНП-5/110

Параметр	ИНП-7/80	ИФП 2000
$W_{\text{пред}}, \text{Дж}$	6887	6687
β	0,29	0,30
$N_{\text{max}}, 10^4 \text{ имп.}$	3,46	2,69
$f_{\text{max}}, \text{Гц}$	0,17	0,27

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате курсовой работы были вычислены электротехнические параметры разрядного контура, термодинамические параметры плазмы и излучательные характеристики импульсных ксеноновых ламп ИНП-7/80 и ИФП 2000 в установке фотонного отжига при рабочем напряжении $U_0 = 850$ В и емкости конденсатора $C = 5575$ мкФ. В обоих случаях был реализован закритический режим ($\gamma = 15,2$ для трех последовательно соединённых ИНП-7/80 и $\gamma = 4,13$ для ИФП 2000). В лампах реализовался установившийся режим разряда, и в основной стадии процесса все сечение колбы заполнено плазмой так как время заполнения лампы плазмой много меньше времени максимума тока разряда.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что применение трех последовательно соединенных ламп ИНП-7/80 существенно увеличивает общее сопротивление контура, так в контуре с ИНП-7/80 $R_{\Sigma} = 2,23$ Ом, что в больше R_{Σ} в контуре с ИФП 2000 практически в 7 раз. Из-за большого суммарного сопротивления, процент энергии, которая перешла в излучение на лампе, составил 19 %, в то время как в контуре с ИФП 2000 КПД составил 69,4 %. Всё это показывает неэффективность использования трех последовательно соединенных ламп ИНП-7/80 в установках фотонного отжига.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Stroyuk, Oleksandr & Andriushyna, Nataliia & Kuchmy, S. & Pokhodenko, V. (2015). Photochemical Processes Involving Graphene Oxide. Theoretical and Experimental Chemistry. 51. 1-29.
2. Камруков А.С., Кулебякина А.И. Инженерные методы расчета импульсных ксеноновых ламп: Учеб. пособие / Под. Ред. Н.П. Козлова; кафедра «Плазменные энергетические установки (Э-8). – М.: ООО НИЦ «Инженер», 2010. – 222с.
3. Кугушев Д.Н. Разработка импульсного источника УФ-излучения с U-образным плазменным каналом для оптико-электронных систем обеззараживания воздуха и поверхностей: дис. канд тех. наук: 2.2.1. - М., 2021
4. Баранов М. И. Выбор сечений электрических проводов и кабелей в цепях устройств высоковольтной сильноточной импульсной техники //Электро-техника и электромеханика. – 2018. – №. 6. – С. 56-62.
5. Физические величины: Справочник/А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др.; Под. ред. И. С. Григорьева, Е. 3. Мейлихова. - М.; Энергоатомиздат, 1991. - 1232 с.
6. Компания ООО " *ELECTRONICON*", PK16, GA85, E61– *HIGH DENSITY DC FILM CAPACITORS* [Электронный ресурс] URL: 200.003-020030_PK16_2019.pdf (efo.ru) (дата обращения 15.11.2022).
7. Импульсные источники света [Текст] / И. С. Маршак, А. С. Дойников, В. П. Жильцов [и др.] – 2-е изд., перераб. И доп. – М. : Энергия, 1978 – 472 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Код программы *Mathlab*:

```
clear;
%Dано:
d=1.1;%Диаметр лампы, см
l=13;%Межэлектр расстояние, см
P_0=3.99e4;% начальное давление ксенона, Па
P_0m=300;% начальное давление ксенона, мм рт. ст.
P=[624e3:1e3:1e7];%Мощность, Вт
S= pi*d^2/4;% площадь поперечного сечения лампы, см^2
lambda=[190:10:1100]; %длин волны, нм
% lambda=[190,230,270,300,350,430,555,700,850,1000,1100];
k=8.63*10^(-5); % постоянная Больцмана, Эв/град
U_0=400;%Рабочее напряжение, В
L=9*10^(-6); %Индуктивность контура, Г
mu_0=4*pi*1e-7;%маг пост
mu_cu=1;
mu_pl=1;
M_0=2.2*1e-25;% масса атома ксенона в кг
R_0=0.025;%паразитное сопротивление,Ом
W_0=2000;%электрическая энергия импульса, Дж
h=4.136*10^(-15);
% Конструктивный параметр лампы
K_0=1.27*(1/d)*(P_0m/450)^0.2;
C=5575*1e-6;
U_0=sqrt(2*W_0/(C));
U_0=850;

%%
R_0=39.24*1e-3;
L_sumopt=30*1e-6;
K_0=1.27*(1/d)*(P_0m/450)^0.2;
sim('RLCIFP2000.slx');
t=ans.simout.time;
I=ans.simout.data;
U=ans.simout1.data;
I_max=max(ans.simout.data);
R_lamp=K_0/sqrt(I_max); %сопротивление лампы
R_sum=R_lamp+R_0; %4.Суммарное сопротивление контура с лам-
пой
P_el=I_max^2*R_sum; %Максимальная электрическая мощность,
развиваемая контуром
P_lamp=I_max^2*R_lamp; %Макс мощность развиваемая в лампе
eta_pl=R_lamp/R_sum; %эффективность передачи запасаемой энер-
гии в плазму (КПД)
j_max=I_max/S; %Максимальная плотность тока в лампе
```

```

k_i=find(ans.simout.data==I_max); %индекс значения максимума
тока
t_max=t(k_i); %Максимум тока достигается в данный момент вре-
мени
%1. Волновое сопротивление контура
Z_0=sqrt(L/C); %Om
%4.Суммарное сопротивление контура с лампой
R_sum=R_lamp+R_0;
%6. Параметр затухания контура
gamma=R_sum/(2*Z_0);
if gamma<1
    disp('Докритическое затухание')
    omega_0=1/sqrt(L*C);
    omega=omega_0*sqrt(1-gamma^2);
    t_m=(pi/2-atan((R_sum)/(2*L*omega)))/omega;
    I_m=(U_0)/(omega*L)*exp(-(R_sum)/(2*L)*t_m);
elseif gamma==1
    disp('Критическое затухание')
    I_m=2/exp(1)*(U_0)/(R_sum);
    t_m=2*L/R_sum;
else
    disp('Затухание больше критического')
    alpha_1=(R_sum)/(2*L)*(1-sqrt(1-gamma^(-2)));
    alpha_2=(R_sum)/(2*L)*(1+sqrt(1-gamma^(-2)));
    t_m=1/(alpha_2-alpha_1)*log(alpha_2/alpha_1);
    I_m=(U_0)/(R_sum*sqrt(1-gamma^(-2)))*(exp(-alpha_1*t_m)-
exp(-alpha_2*t_m));
end
%11. Характерное время энерговклада в лампу
W_0=(C*U_0^2)/2; %запас в конденс энергия, Дж
% t_05=(eta_pl*W_0)/(P_lamp);
t_05=1.2*10^(-3);
t_037=1.6*10^(-3);
%12. Определение времени заполнения лампы плазмой по эмп форм
Андреева
t_zap=3*10^3*d*sqrt(P_0m)*(U_0/l)^(-1.5);%время заполнения,
мкс
v=(d*10^-2)/(t_zap*10^(-6));%время заполнения, м/с
%13. Температура плазмы в установившемся режиме
T_pl=3.5e3*(S/P_0)^(1/16)*j_max^(1/4);
%14. Расчет термодинам параметров при условии лок равновесия
n_sum=3.3*10^(16)*P_0m;%суммарное число тяж частиц
%%%расчет степени ионизации
er=100;
koef=4.9*1e15*4*(T_pl^(3/2))/n_sum;
I_0=12.16;%потенциал ионизации,эВ
kT=T_pl/11600;
deltaI_0=0;%в первом приближении

```

```

while er>1
    A=koef*exp(-(I_0-deltaI_0)/(kT));
    alpha_ioniz=-A/2+sqrt((A^2)/(4)+A);
    n_e=alpha_ioniz*n_sum;
    delta=deltaI_0;
    deltaI_0=2.1*1e-8*(n_e/T_pl)^(1/2);
    er=((deltaI_0-delta)/deltaI_0)*100;
end
%15. Расчет внутренней энергии плазмы.
epsilon=1.1*3/2*kT*(1+alpha_ioniz)+(I_0-deltaI_0)*alpha_ioniz; %эВ/час. с учетом электронов

E_vnyd=epsilon*(1.6*1e-19)/(M_0); %удельная внутр энергия, Дж/кг
m_pl=n_sum*S*1*M_0; %масса плазмы в межэлектродном промежутке
E_vn=E_vnyd*m_pl;
%16. Эффективный показатель адиабаты ксен плазмы.
gamma_adiab=1+(1+alpha_ioniz)*(kT)/epsilon;
%17. Скорость звука в плазме.
c_zv=sqrt(gamma_adiab*(gamma_adiab-1)*E_vnyd);
t_gd=d/c_zv; %время выравнивания параметров
%18. Давление в лампе.
p=4.55*1e-7*P_0m*T_pl*(1-alpha_ioniz);

%19. Расчет проводимости плазмы лампы
%%
Lambda=1.24*10^4*(T_pl^(3/2))/sqrt(n_e); %кулоновский логарифм
Z_ef=1+53*(n_e^(1/3))/(T_pl)^2; %эффективный заряд ионов
sigma_sp=1.54*10^-4*T_pl^(3/2)/(Z_ef*log(Lambda)); % Спитцеровская проводимость плазмы, (ом*см)^-1
%21. Спектральный поток трубчатой ксеноновой лампы-Норман
gamma_=1.66*10^-3*n_e^(1/3)/T_pl;
Gamma_[0.12,0.125,0.13,0.135,0.140,0.15,0.16,0.17,0.18,0.2,0.25];
E_optim=[0,0.5,1.0,1.25,1.4,1.65,1.8,1.94,2.0,2.12,2.17];
index=0;
i=1;
while index==0

    if gamma_>Gamma_(1,i)
        i=i+1;
    else
        index=i;
    end

end
end
if i>1

```

```

E_opt=E_optim(1,index-1)+((gamma_-Gamma_(1,index-1))*(E_optim(1,index)-E_optim(1,index-1)))/(Gamma_(1,index)-Gamma_(1,index-1)); %ЭВ
else
    E_opt=0;
end
hdv=10^(-5)*n_e^(0.267);%энергетический сдвиг порога фотоиониз, ЭВ
%er-снижение потенциала ионизации;
%%
hv=(h*3*10^8)./(lambda.*10^-9);
for i = 1:size(lambda,2)%коэффициент поглощения
    if hv(1,i)<(2.6-hdv);
        f_g=(exp((hv(1,i)+hdv)/(kT))-exp(E_opt/(kT))+1.2)/(exp((hv(1,i)+hdv)/(kT))-1+1.2);
        k_v=2*10^-37*(n_e^2)/(sqrt(kT)*(hv(1,i))^2)*(exp((hv(1,i)+hdv-deltaI_0)/(kT))+1.2)*f_g*(1-exp(-hv(1,i)/kT));
    elseif 2.6-hdv<hv(1,i)<6.2;
        f_g=(exp(2.6/(kT))-exp(E_opt/(kT))+1.2)/(exp((2.6)/(kT))-1+1.2);
        k_v=2*10^(-37)*(n_e^2)/(sqrt(kT)*(hv(1,i))^2)*(exp((2.6-deltaI_0)/(kT))+1.2)*f_g*(1-exp(-hv(1,i)/kT));
    else
        k_v=0.2*(6.2)^3/(hv(1,i))^3*(1-exp(-hv(1,i)/kT))/(1-exp(-6.2/kT));
    end
    k_V(1,i)=k_v;
    t_L=k_V.*d;

    if t_L(1,i)>=0.5;
        alpha_2(1,i)=0.9;
    else
        alpha_2(1,i)=1;
    end

if lambda(1,i)<=190;%коэф пропускания колбы на длинне
    K_Lst(1,i)=0;
elseif lambda(1,i)<=230;
    K_Lst(1,i)=0.65;
elseif lambda(1,i)<270;
    K_Lst(1,i)=0.7;
elseif lambda(1,i)==270;
    K_Lst(1,i)=0.9;
else
    K_Lst(1,i)=0.92;
end

```

```

P_L(1,i)=0.9*K_Lst(1,i)*(11.9)/(lambda(1,i)/1000)^5*(pi^2*d*1
)/(exp((1.44*10^7)/(T_pl*lambda(1,i)))-1)*(1-exp(-al-
pha_2(1,i)*t_L(1,i))); %Вт/нм
% P_L=P_l(1,i);
end
I_L=(P_L)./(pi^2);%спектральная сила излучения
B_L=I_L./(d*1);
T_lambda1=1.44*1e4./((lambda./1000).*log((11.9./(B_L.*(lambda
/1000).^5))+1));%яркостная температура.
P_s=W_0/(pi*d*1*t_05);% пов мощ эл энергии лампы, Вт/см^2
% T_lambda2=570*P_s^(0.25); %яркостная температура по прибли-
женной формуле.
delta_labd=422;
II=delta_labd*max(I_L);
P_izl=pi^2*II;
E_izl=P_izl*t_05;
KPD_izl=E_izl/W_0
%25. Сила света лампы
d_labda05=100; %полуширина спектр диапазона
I_cv=683*I_L(1,3)*d_labda05;%сила света, кд
plot(lambda,k_V)
I_Ltransp=I_L.';
%%
I_Lmax=max(I_L);
k_Vtransp=k_V.';
lambda_transp=lambda.';
P_L_transp=P_L.';
I_Ltransp=I_L.';
T_lambdatransp=T_lambda1.';
%%
W_pred=13.5*10^3*d*1*sqrt(t_05);
B=W_0/W_pred;
N_max=B^(-8.5);
f_1=(15*pi*0.9*1)/W_0;
f_2=(30*pi*0.9*1)/W_0;
f_3=(200*pi*0.9*1)/W_0;
6*(5.37*10^(-5)*570*P_s^(0.25)-0.372)*P_s*sqrt(t_037);

```