

Физико-математическое моделирование энергетических процессов в импульсных прямых ксеноновых лампах, работающих в электрических схемах

Часть 2

Юрий Мандрыко, Александр Чирцов (Санкт-Петербург)

Во второй части статьи приводятся результаты экспериментальных измерений и их сопоставление с расчётными данными, полученными при помощи физико-математического моделирования временных характеристик энергетических параметров плазменного канала дугового электрического разряда в импульсных прямых ксеноновых лампах при работе в электрических схемах на основе модулятора с квазистабильными по амплитуде прямоугольными импульсами напряжения.

Эксперимент

Соответствие результатов экспериментальных исследований и расчётов, проведённых в рамках построенной физико-математической модели, проверялось на лампе типа ИНП-5/45 для двух значений электрического напряжения ($U_{\text{lamp } 1}=169 \text{ В}$ и $U_{\text{lamp } 2}=223 \text{ В}$) на накопительной ёмкости $C_{\text{к}}=13 \text{ мФ}$ блока конденсаторов для второго режима функционирования электрической схемы питания (см. рис. 1 в части 1). Силовой импульс напряжения накачки был приложен к газоразрядному промежутку лампы, между электродами которой предварительно был сформирован плазменный канал псевдодежурной дуги.

Регистрация переходных характеристик мгновенных напряжений, пропор-

циональных переходным характеристикам мгновенных напряжений накачки между электродами ИКЛ $u_{\text{lamp}}(t)$, осуществлялась с помощью резистора R5, находящегося в нижнем плече резисторного делителя R5–R6. Мгновенные напряжения, снимаемые с резистора R5, пропорциональны мгновенным напряжениям накачки $u_{\text{lamp}}(t)$ между электродами (анодом и катодом) ИКЛ. Регистрация экспериментальных временных зависимостей мгновенных электрических токов накачки $i_{\text{channel}}(t)$ в плазменном канале импульсной ксеноновой лампы ИКЛ, приведённых на рисунках 1а, 1б вместе с результатами решения системы уравнений для расчёта мгновенных токов $i_{\text{channel}}(t)$ в плазменном канале, осуществлялась с помощью

резистора (активного сопротивления) R3. На представленных рисунках: 1 и 1* – экспериментальная и рассчитанная характеристики при $U_{\text{lamp } 1}=169 \text{ В}$; 2 и 2* – экспериментальная и рассчитанная характеристики при $U_{\text{lamp } 2}=223 \text{ В}$. Экспериментальные временные характеристики мгновенных электрических мощностей накачки, поступающих в лампу, были определены с помощью электрических напряжений накачки U_{lamp} между электродами лампы ИКЛ и измеренных временных характеристик мгновенных электрических токов накачки $i_{\text{channel}}(t)$ в плазменном канале. Импульсный стабилитрон (диод Зенера) VD4 предназначен для защиты осциллографа 3 от перенапряжений на резисторе R5, возникающих при отсутствии стабилитрона VD4, во время воздействия импульса высокого напряжения зажигания (поджига) между анодом и катодом ИКЛ.

Как следует из рисунков 1а, 1б, экспериментальные и рассчитанные временные зависимости мгновенных токов $i_{\text{channel}}(t)$ в процессе формирования ксенонового плазменного канала дугового электрического разряда в ИКЛ удовлетворительно согласуются между собой, что свидетельствует об адекват-

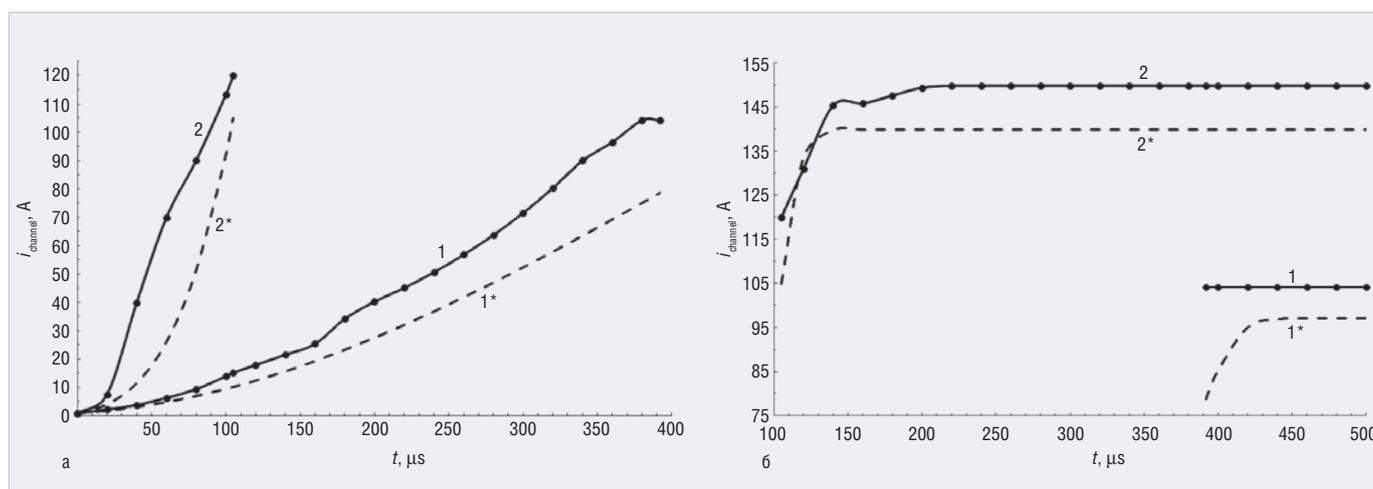


Рис. 1. Временные зависимости мгновенных электрических токов $i_{\text{channel}}(t)$: а) в расширяющемся плазменном канале; б) в установившемся по объёму плазменном канале

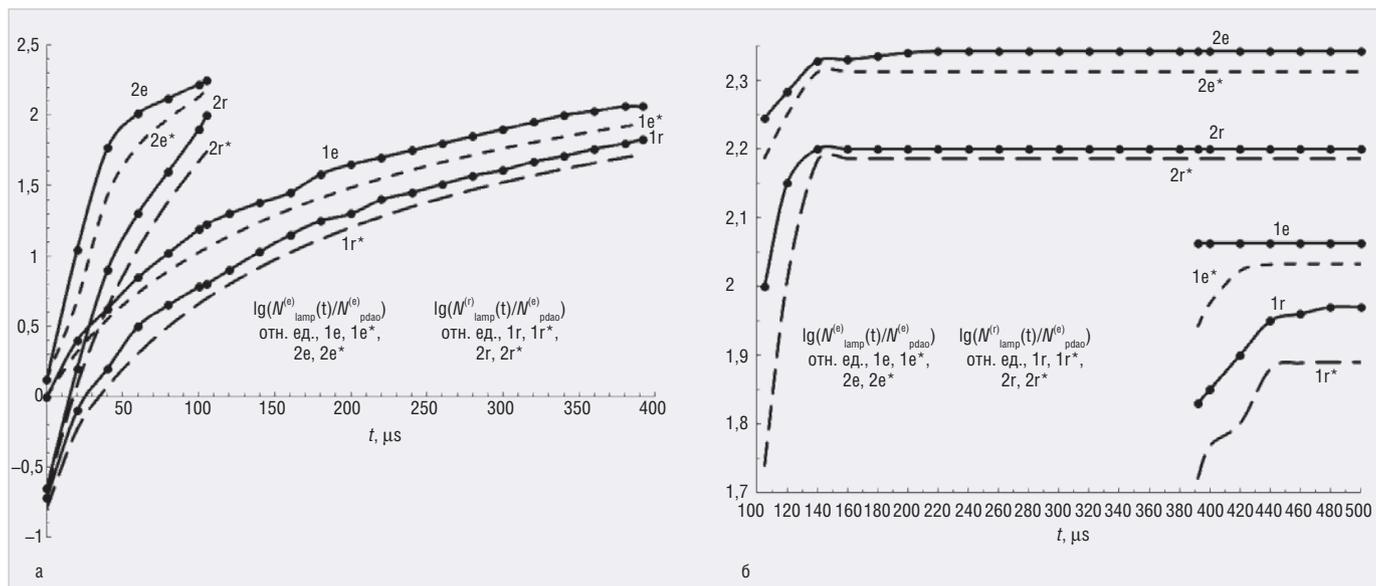


Рис. 2. Временные зависимости $\lg(N_{lamp}^{(e)}(t)/N_{pdao}^{(e)})$ и $\lg(N_{lamp}^{(r)}(t)/N_{pdao}^{(e)})$ на стадиях: а) расширения неравновесного плазменного канала; б) увеличения и поддержания температуры равновесного плазменного канала

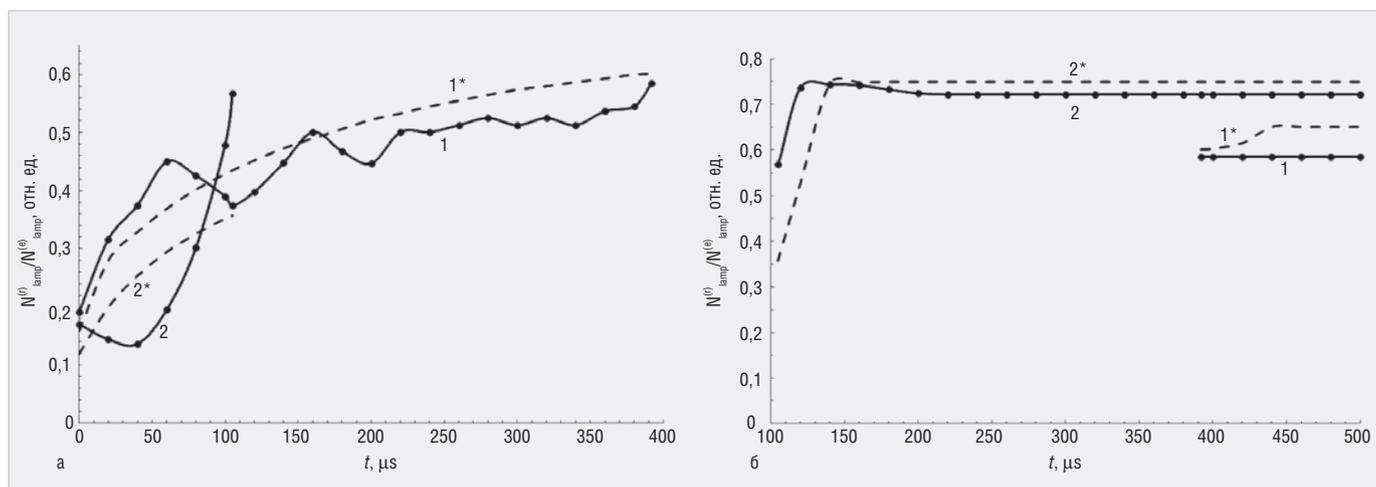


Рис. 3. Временные зависимости $N_{lamp}^{(r)}/N_{lamp}^{(e)}$ на стадиях: а) расширения неравновесного плазменного канала; б) увеличения и поддержания температуры равновесного плазменного канала

ности предложенных физико-математических моделей по отношению к экспериментальным измерениям.

Регистрация переходных характеристик поверхностных плотностей мощностей излучения ИКЛ осуществлялась с помощью фотоприёмника VD3 и резистора (активного сопротивления) R4. По экспериментальным переходным характеристикам поверхностных плотностей мощностей излучения ИКЛ, заданному расстоянию от лампы до фотоприёмника, известной длине газоразрядного промежутка между анодом и катодом лампы, известной площади поперечного сечения фоточувствительной области фотоприёмника определены экспериментальные переходные характеристики мощностей излучения ИКЛ (ИНПКЛ) $N_{lamp}^{(r)}(t)$.

На рисунках 2а, 2б приведены экспериментальные и расчётные временные зависимости десятичных логарифмов от поступающих в ИКЛ нормированных мгновенных электрических мощностей $\lg(N_{lamp}^{(e)}(t)/N_{pdao}^{(e)})$ (2) и нормированных мощностей излучения $\lg(N_{lamp}^{(r)}(t)/N_{pdao}^{(e)})$ (19) импульсной ксеноновой лампы относительно поступающей электрической мощности в плазменный канал псевдодежурной дуги. 1е и 1е* – экспериментальная и рассчитанная характеристики электрических мощностей при $U_{lamp 1}=169$ В; 2е и 2е* – то же при $U_{lamp 2}=223$ В; 1г и 1г* – экспериментальная и рассчитанная характеристики мощностей излучения при $U_{lamp 1}=169$ В; 2г и 2г* – то же при $U_{lamp 2}=223$ В.

Как следует из рисунков 2а, 2б, экспериментальные и рассчитанные вре-

менные зависимости десятичных логарифмов от поступающих в импульсную ксеноновую лампу нормированных мгновенных электрических мощностей $\lg(N_{lamp}^{(e)}(t)/N_{pdao}^{(e)})$ и её нормированных мгновенных мощностей излучения $\lg(N_{lamp}^{(r)}(t)/N_{pdao}^{(e)})$ в процессе формирования ксенонового плазменного канала дугового электрического разряда в ИКЛ удовлетворительно согласуются между собой при одном и том же значении напряжения на лампе. Также следует учесть, что увеличение напряжения между электродами лампы сопровождается возрастанием скоростей нарастания и сокращением длительностей фронтов поступающих в неё электрических мощностей и излучаемых ею мощностей.

На рисунках 3а, 3б представлены рассчитанные и эксперименталь-

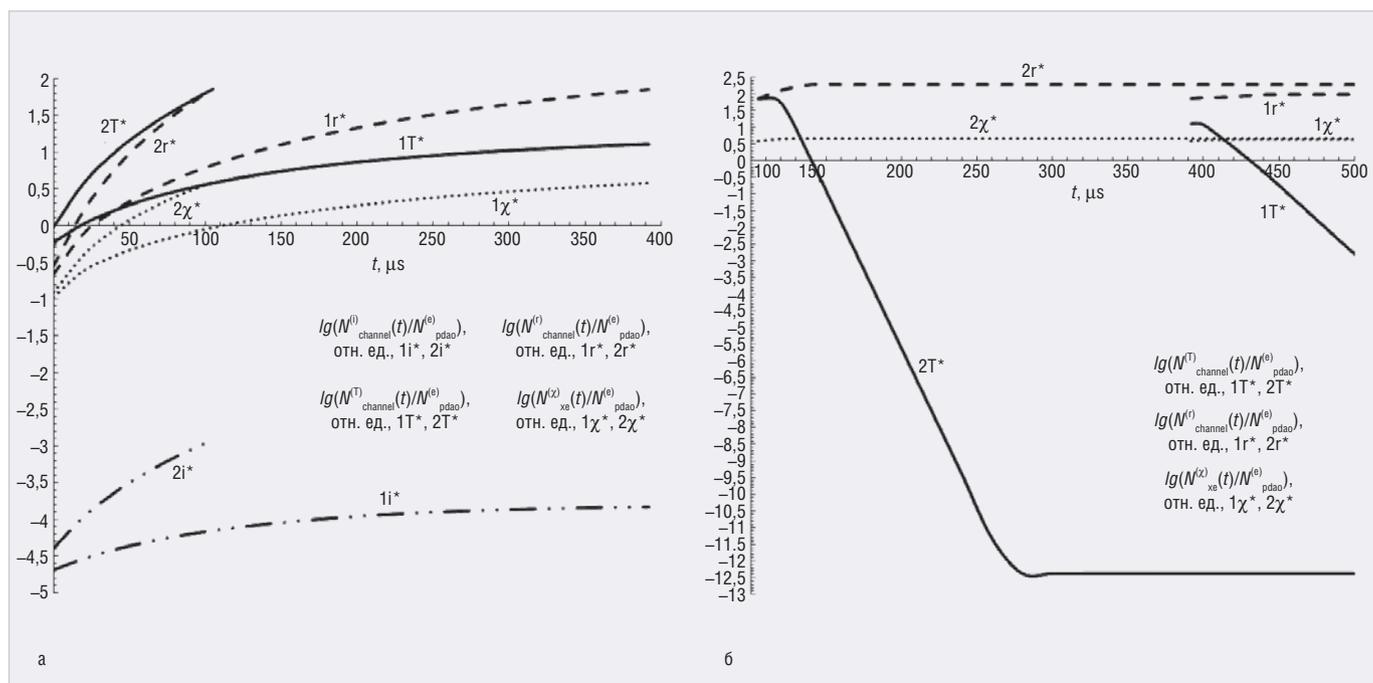


Рис. 4. Рассчитанные временные зависимости $\lg(N^{(i)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$, $\lg(N^{(T)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$, $\lg(N^{(r)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$, $\lg(N^{(\chi)}_{xc}(t)/N^{(e)}_{pdo})$ на стадиях: а) расширения неравновесного плазменного канала; б) увеличения и поддержания температуры равновесного плазменного канала

ные временные зависимости эффективностей преобразования подводимых к импульсной ксеноновой лампе силовых импульсов электрических мощностей накачки в импульсы мощностей излучения лампы $N^{(r)}_{lamp}/N^{(e)}_{lamp}$. 1 и 1* – экспериментальная и расчётная характеристики при $U_{lamp1}=169$ В; 2 и 2* – экспериментальная и расчётная характеристики при $U_{lamp2}=223$ В.

Из рисунков 3а, 3б видно, что по мере расширения плазменного канала и увеличения его температуры эффективность преобразования поступающих в импульсную ксеноновую лампу электрических мощностей в мощность её излучения увеличивается с течением времени при фиксированном напряжении между анодом и катодом лампы. Также следует учесть, что увеличение напряжения между электродами лампы сопровождается возрастанием скоростей нарастания и сокращением длительностей фронтов эффективностей преобразования поступающих в лампу электрических мощностей в мощность её излучения.

На рисунках 4а, 4б приведены расчётные временные зависимости десятичных логарифмов от нормированных мощностей для ионизации расширяющегося неравновесного плазменного канала $\lg(N^{(i)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$ (5), нагрева плазменного канала $\lg(N^{(T)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$

(13), (16), излучения плазменного канала $\lg(N^{(r)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$ (18) и теплоотдачи из канала в окружающую среду $\lg(N^{(\chi)}_{xc}(t)/N^{(e)}_{pdo})$ (23) относительно поступающей электрической мощности в плазменный канал псевдодежурной дуги. На рисунке 4а: $\lg(N^{(i)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$: 1i*, 2i* – при $U_{lamp1}=169$ В и $U_{lamp2}=223$ В; $\lg(N^{(T)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$: 1T*, 2T* – при $U_{lamp1}=169$ В и $U_{lamp2}=223$ В; $\lg(N^{(r)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$: 1r*, 2r* – при $U_{lamp1}=169$ В и $U_{lamp2}=223$ В; $\lg(N^{(\chi)}_{xc}(t)/N^{(e)}_{pdo})$: 1χ*, 2χ* – при $U_{lamp1}=169$ В и $U_{lamp2}=223$ В. На рисунке 4б: $\lg(N^{(i)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$: 1i*, 2i* – при $U_{lamp1}=169$ В и $U_{lamp2}=223$ В; $\lg(N^{(T)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$: 1T*, 2T* – при $U_{lamp1}=169$ В и $U_{lamp2}=223$ В; $\lg(N^{(r)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$: 1r*, 2r* – при $U_{lamp1}=169$ В и $U_{lamp2}=223$ В; $\lg(N^{(\chi)}_{xc}(t)/N^{(e)}_{pdo})$: 1χ*, 2χ* – при $U_{lamp1}=169$ В и $U_{lamp2}=223$ В.

Как и следовало ожидать, в процессе расширения неравновесного плазменного канала временные зависимости десятичных логарифмов от нормированных мощностей для ионизации расширяющегося плазменного канала $\lg(N^{(i)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$, нагрева плазменного канала $\lg(N^{(T)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$, излучения плазменного канала $\lg(N^{(r)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$ и теплоотдачи из канала в окружающую среду $\lg(N^{(\chi)}_{xc}(t)/N^{(e)}_{pdo})$ увеличиваются со временем при одном и том же значении напряжения на лампе. При этом увеличение напряжения между электродами лампы ведёт к возрастанию скоростей нарастания мощностей для

ионизации расширяющегося плазменного канала, нагрева плазменного канала, излучения плазменного канала и теплоотдачи из него в окружающую среду.

На стадиях увеличения и поддержания температуры равновесного плазменного канала временные зависимости десятичных логарифмов от нормированных мощностей для излучения плазменного канала $\lg(N^{(r)}_{channel}(t)/N^{(e)}_{pdo})$ увеличиваются со временем и устанавливаются по амплитуде при фиксированном значении напряжения на лампе. При этом увеличение напряжения между электродами лампы ведёт к возрастанию скоростей нарастания и амплитуд мощностей для излучения плазменного канала.

На рисунках 5а, 5б приведены расчётные временные зависимости спектральных относительных коэффициентов поглощения излучения A_T (20) плазменного канала в ИКЛ. Условные обозначение: 1* – при $U_{lamp1}=169$ В, 2* – при $U_{lamp2}=223$ В.

Представленные на рисунках 5а, 5б временные зависимости спектральных относительных коэффициентов поглощения излучения A_T (20) демонстрируют схожее поведение, то есть монотонное возрастание на протяжении стадий расширения канала и увеличения температуры равновесного плазменного канала, а на стадии поддержания температуры равно-

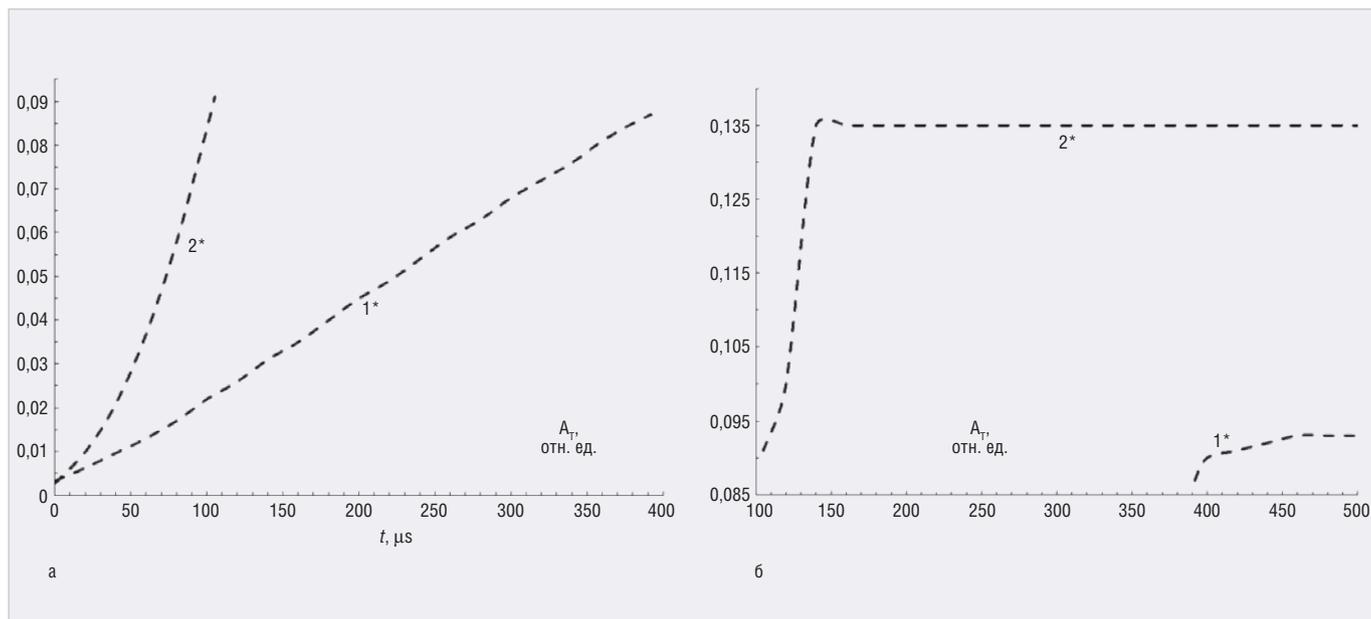


Рис. 5. Расчётные временные зависимости спектральных относительных коэффициентов поглощения излучения A_T плазменного канала в ИКЛ:
а) расширяющегося; б) равновесного

весного плазменного канала происходит установление этих коэффициентов поглощения излучения по амплитуде. При увеличении электрического напряжения, прикладываемого к газоразрядному промежутку лампы, наблюдается увеличение характерных скоростей возрастания спектральных относительных коэффициентов поглощения излучения плазменного канала.

Из временных зависимостей тепловых мощностей, расходуемых на разогрев плазменного канала и теплоотдачу из него в окружающую среду, продемонстрированных на рисунках 4а, 4б, следует, что основным ограничителем коэффициента полезного действия преобразования электрической энергии, поступившей в импульсную ксеноновую лампу за длительность импульса тока накачки, в энергию излучения за тот же интервал времени являются тепловые потери.

Удовлетворительное совпадение результатов физико-математического моделирования с экспериментальными исследованиями позволяет говорить о применимости предложенных физико-математических моделей для определения временных характеристик физических параметров плазменного канала импульсного дугового электрического разряда в импульсных ксеноновых лампах.

Создание описанных физико-математических моделей плазменного кана-

ла позволяет не только получить расчёты для полномасштабного плазменного моделирования, учитывающего специфику существенных для рассматриваемой системы элементарных столкновительных и радиационных процессов в плазме, но и даёт возможность оценить ряд важных для оптимизации режимов работы газоразрядных ламп накачки внутренних физических параметров нелокального нестационарного плазменного канала.

Низкая эффективности преобразования поступающих в импульсную ксеноновую лампу электрических мощностей в мощность её излучения на стадии расширения ксенонового неравновесного плазменного канала обусловлена доминированием энергетических потоков, расходуемых на создание, разогрев и формирование плазменного канала в газоразрядном промежутке лампы. На стадиях увеличения и поддержания температуры равновесного плазменного канала, являющихся последующими стадиями горения дугового электрического газового разряда, происходит существенное перераспределение энергетических потоков, что приводит к возрастанию эффективности преобразования поступающих в импульсную ксеноновую лампу электрических мощностей в мощность её излучения.

Заключение

Описанная работа является этапом комплексного прикладного исследо-

вания нелокальной плазмы импульсного дугового электрического разряда в ксеноновых лампах для оптической накачки. Работа выполнена в рамках серии исследований, посвящённых разработке эффективных методов физико-математического моделирования нелокальной газоразрядной плазмы и их использования для практических приложений. Полученные в настоящей работе результаты будут использованы в качестве приближения для многопараметрического моделирования плазмы в весьма сложном и интересном для теории и практики моделирования случае нестационарной фазы развития электрического газового разряда. В этой связи представляется интересным сопоставление результатов проделанного в рамках энергетического подхода квазианалитического рассмотрения с результатами популярных сегодня существенно более ресурсоёмких физико-математических моделей, основанных на учёте совокупности элементарных плазменных процессов в рамках квазигидродинамических приближений.

С точки зрения задач для оптимизации работы импульсных ламп оптической накачки, данная работа будет продолжена. Совокупность физико-математических моделей, базирующихся на системах уравнений, будет использоваться как база для решения задач для оптимизации режимов работы импульсных ксеноновых ламп.

