

УДК 621.039.576

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ С ВОДОГРАФИТОВЫМ РЕАКТОРОМ ПРИ ЧАСТИЧНЫХ НАГРУЗКАХ

А.В. Воробьев, А.М. Антонова

Томский политехнический университет

E-mail: worob@tpu.ru

*Предложен и обоснован способ эксплуатации водографитового реактора типа РБМК при регулируемом составе продувочного газа. Приведены экспериментально найденные статические и динамические характеристики температурного состояния графитового замедлителя реактора РБМК-1000. Разработан программный код для инженерных расчетов интегральных характеристик, определяющих величину запаса реактивности реактора РБМК-1000, в медленных переходных процессах.*

### Ключевые слова:

*Водографитовый реактор, продувочный газ, температура замедлителя, коэффициент теплопередачи, экспериментальные характеристики, моделирование.*

### Key words:

*Water-graphite reactor, blow-down gas, moderator temperature, heat transfer coefficient, experimental characteristics, modeling.*

### Введение

Одним из факторов, определяющих надежность и безопасность работы АЭС с водографитовыми реакторами, является надежность графитового замедлителя (кладки), рассчитанного на весь срок эксплуатации реактора.

Графитовая кладка реактора РБМК-1000 имеет форму цилиндра диаметром 11,8 м и высотой 7 м, составленного из 2488 колонн, собранных из графитовых блоков сечением 0,25×0,25 м с осевыми цилиндрическими отверстиями. В отверстиях установлены трубы каналов (ТК, СУЗ и др.). Теплообменники сборки, расположенные внутри каналов, охлаждаются водой с температурой 250...280 °С. При работе реактора часть (5...6 %) полной тепловой мощности реактора выделяется в графите кладки. Это тепло также отводится к трубам ТК. Для обеспечения теплового контакта с блоками на трубы каналов надеты разрезные графитовые кольца, а в зазоры между трубами и блоками подается продувочный газ (штатный состав 10 % азота и 90 % гелия, по объему). Конструктивные и схемные решения реакторных установок РБМК позволяют осуществлять изменение состава продувочного газа [1].

Температурное поле в графитовой кладке определяется в первую очередь мощностью реактора. Влияет на температуру графита и содержание азота  $C_N$  в азотно-гелиевой смеси (далее – состав продувочного газа), т. к. ее компоненты существенно различаются по теплофизическим свойствам: теплопроводность у гелия почти в шесть раз выше, чем у азота.

Температура графита кладки является одним из основных параметров, лимитирующих работу реактора РБМК. В практике принято, что на всех режимах работы реактора максимальная температура графита не должна превышать значения пороговой температуры 750...800 °С [1, 2], при которой окисление графита в присутствии водяных паров идет более интенсивно. При нестационарных ре-

жимах работы реакторов РБМК влияние графитовой кладки на надежность и безопасность АЭС ещё более возрастает, т. к. изменения мощности реактора связаны с термоциклическими напряжениями в графите и могут привести к преждевременному разрушению кладки. Кроме того, колебания средней температуры графита кладки (замедлителя) ведут к соответствующим изменениям реактивности реактора, т. к. аппараты типа РБМК обладают существенным по величине положительным эффектом реактивности по температуре замедлителя [1, 3].

Эффект, связанный с изменением температуры графита при изменении состава смеси, может быть использован для повышения эффективности работы энергоблоков РБМК на частичных нагрузках. Для этого, например, при снижении мощности реактора увеличивают содержание азота в продувочной смеси. Отвод тепла от графита уменьшается, температура его растёт и этим компенсируется изменение температуры, а значит и реактивности, из-за изменения мощности [4, 5].

Следовательно, определение температурных характеристик графитовой кладки реактора РБМК, а также обоснование способов управления ее тепловым состоянием является актуальной задачей.

### 1. Экспериментальные исследования

Решение поставленной задачи требует знания соответствующих статических и динамических характеристик графитового замедлителя. Аналитическое определение большинства из них представляет достаточно сложную задачу. Поэтому при построении модели объекта широко использовались результаты экспериментальных исследований на реакторах РБМК-1000 первой очереди Ленинградской АЭС.

Специфические условия работы оборудования АЭС обусловили использование для измерения основных исследуемых параметров штатных приборов с привлечением системы централизованного

контроля (СЦК) «Скала». Для измерения температуры графита установлено 12 блоков термопар БТ-0170 (8 – в а.з.). Каждый блок состоит из трех термопар ТХА-1449. Анализ состава продувочной смеси осуществлялся посредством двух (на входе и выходе) термокондуктометрических газоанализаторов типа ТП4102 с платиновой нитью в качестве чувствительного элемента. Измерение расхода смеси производилось с помощью дифманометра ДМ-3573. Суммарная погрешность определения основных исследуемых параметров не превышала  $\pm(2,5...4) \%$  для содержания азота в продувочной смеси,  $\pm(9...15)^\circ\text{C}$  – для температуры графита,  $\pm(12...15) \text{ нм}^2/\text{ч}$  – для расхода смеси.

Для определения статических характеристик графитовой кладки реактора проводились эксперименты со ступенчатым изменением состава продувочной смеси. В рамках каждого эксперимента, включающего от трех до восьми опытов, мощность аппарата поддерживалась неизменной, а состав газовой смеси менялся от опыта к опыту. Промежуток времени между двумя соседними опытами определялся длительностью переходных процессов по температуре графита кладки и составлял 3...5 часов. Входные параметры в экспериментах варьировались в достаточно широких пределах: содержание азота в продувочной смеси – от 7 до 100 %, тепловая мощность реактора – от 1600 до 3180 МВт.

В качестве выходной величины рассматривалась средняя по кладке температура  $t_{\text{ГК}}$  на стыках графитовых колонн, рассчитываемая в СЦК «Скала» по штатной программе.

После первичной обработки проведенных экспериментов статистически значимыми оказались результаты 18 опытов. Для их аппроксимации были выбраны квадратичный и линейный полиномы, оценка параметров последних производилась с помощью традиционного метода наименьших квадратов. Проверка адекватности моделей осуществлялась по  $F$ -критерию; значимость (уровень  $\alpha=0,9$ ) коэффициентов регрессии – с помощью критерия Стьюдента.

Указанные выше квадратичный и линейный полиномы имеют вид [4]:

$$t_{\text{ГК}} = b_0 + b_1 Q_p + b_2 C_N + b_3 Q_p^2 + b_4 Q_p C_N + b_5 Q_p^2, \quad (1)$$

$$t_{\text{ГК}} = d_0 + d_1 Q_p + d_2 C_N, \quad (2)$$

где  $b_0, b_1, b_2, \dots, d_0, d_1, \dots$  – численные значения коэффициентов регрессии;  $Q_p$  – тепловая мощность реактора, МВт;  $C_N$  – содержание азота в продувочной смеси, % (по объему).

Анализ параметров квадратичного полинома (2) позволил определить значения коэффициентов влияния (передачи) тепловой мощности реактора  $k_Q$  и состава продувочной смеси  $k_C$  на температуру графитового замедлителя. Выяснилось, что коэффициент влияния  $k_Q$  существенным образом зависит от состава смеси в кладке: при изменении состава с гелия на азот коэффициент  $k_Q$  увеличивается более чем в два раза (от 0,0643 до 0,1264  $^\circ\text{C}/\text{МВт}$ ). На вели-

чину коэффициента влияния  $k_C$ , напротив, сильное воздействие оказывает уровень мощности аппарата: при изменении тепловой мощности от 3200 до 1600 МВт коэффициент  $k_C$  уменьшается с 1,98 до 0,99  $^\circ\text{C}/\%$ .

Из соответствующего выражения линейного полинома (2) значения искомых коэффициентов передачи получаются следующими:  $k_Q=0,0764^\circ\text{C}/\text{МВт}$ ;  $k_C=1,197^\circ\text{C}/\%$ . Использование более простого линейного полинома дает вполне удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными (рис. 1).

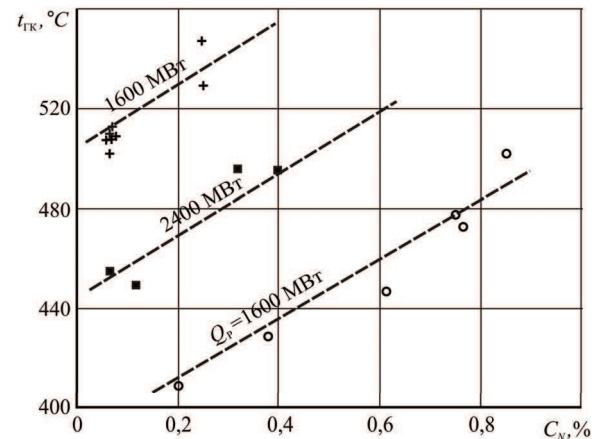


Рис. 1. Зависимость средней температуры графита кладки реактора РБМК-1000 от состава продувочной смеси и тепловой мощности аппарата: --- – расчет по формуле (2); +, ■, ○ – опытные данные при различных нагрузках

Основной задачей динамических экспериментов являлось определение постоянных времени при возмущении тепловой мощности реактора и состава продувочной смеси. В качестве выходной величины также рассматривалась температура графита  $t_{\text{ГК}}$ , осредненная по количеству термопар в активной зоне (а. з.).

Исходной информацией для определения характеристик графитовой кладки при возмущении состава продувочной смеси послужили данные пяти специально спланированных опытов. Для определения динамических характеристик графитовой кладки при возмущении тепловой мощности реактора использовались в основном данные об эксплуатационных режимах.

Полученные переходные кривые по обоим каналам аппроксимировались выражениями типа [6]

$$t_{\text{ГК}} = d_0 + d_1 Q_p + d_2 C_N; \quad (3)$$

$$W(s) = \frac{k \exp(-\tau_2 s)}{(T_2 s + 1)^2}, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент передачи (влияния) для соответствующего канала;  $\tau$  – время транспортного запаздывания;  $T$  – постоянная времени.

Значения параметров передаточных функций приведены в таблице.

Анализ результатов динамических опытов показывает, что существенная инерционность объек-

та по каналу состав продувки — температура графита, кроме всего прочего, обусловлена малыми скоростями движения газа в кладке. За счет увеличения расхода при включении второй газодувки соответствующие постоянные времени могут быть уменьшены более чем в 1,3 раза. Инерционность кладки по каналу тепловая мощность — температура графита существенно меньше, чем при возмущении состава смеси. Динамические характеристики объекта при этом сильно зависят от состава продувочного газа: при изменении состава с азота на гелий постоянная времени уменьшается почти в три раза (таблица).

**Таблица.** Значения передаточных функций графитовой кладки реактора РБМК

Канал	Режим работы газодувок		Примечания
	1 газодувка в работе	2 газодувки в работе	
$t_{II}=f(C_N)$	$\tau_1=25,3$ мин; $T_1=63,4$ мин	$\tau_1=12,4$ мин; $T_1=47,4$ мин	Передаточная функция (3)
	$\tau_2=9,4$ мин; $T_2=38,5$ мин	$\tau_2=2,0$ мин; $T_2=28,8$ мин	Передаточная функция (4)
$t_{II}=f(Q_p)$	$\tau_1=0$ мин; $T_1=81$ мин		Передаточная функция (3); продувка — азот
	$\tau_1=0$ мин; $T_1=29,9$ мин		Передаточная функция (3); продувка — гелий

## 2. Эффекты реактивности реактора РБМК

Основными эффектами реактивности, определяющими динамику ядерного реактора РБМК в эксплуатационных режимах, являются: отравление ксеноном-135; температурный эффект замедлителя; топливный температурный эффект и паровой эффект. Отравление самарием, шлакование и выгорание топлива, оказывающие влияние на реактивность, происходят только в продолжительных (десятки, сотни часов) переходных процессах.

**Отравление реактора ксеноном.** Наиболее важным эффектом, определяющим изменение реактивности по сравнению с другими эффектами, является отравление реактора нуклидом ксенон-135, обладающим максимальным сечением поглощения тепловых нейтронов  $\sigma_{Xe}=3 \cdot 10^{-18}$  см<sup>2</sup>. Дифференциальные уравнения, описывающие временное изменение концентраций йода и ксенона в единичном объеме а. з., имеют вид [7]:

$$\begin{aligned} dN_J/dt &= \gamma_J \Phi \sigma_f N_5 - \lambda_J N_J; \\ dN_{Xe}/dt &= \gamma_{Xe} \Phi \sigma_f N_5 + \lambda_J N_J - \lambda_{Xe} N_{Xe} - \Phi \sigma_{Xe} N_{Xe}, \end{aligned}$$

где  $\gamma_J$ ,  $\gamma_{Xe}$  — парциальный выход йода-135 и ксенона-135;  $\lambda_J$ ,  $\lambda_{Xe}$  — постоянные радиоактивного распада йода-135 и ксенона-135, 1/с;  $\Phi$  — плотность потока тепловых нейтронов, нейтр/(см<sup>2</sup>·с);  $\sigma_f$  — сечение деления урана-235, см<sup>2</sup>;  $\sigma_{Xe}$  — сечение поглощения тепловых нейтронов ксеноном-135, см<sup>2</sup>;  $N_5$ ,  $N_J$ ,  $N_{Xe}$  — концентрации ядер урана-235, йода-135 и ксенона-135, 1/см<sup>3</sup>.

**Эффект реактивности по температуре замедлителя.** Вторым по значению из эффектов, определяю-

щих поведение оперативного запаса реактивности в переходных режимах, является температурный эффект графитового замедлителя. При увеличении температуры графита он вызывает увеличение коэффициента размножения, т. е. представляет собой положительную обратную связь.

Изменение реактивности, соответствующее изменению температуры графитового замедлителя на 1 градус, называется температурным коэффициентом реактивности замедлителя, 1/°C:

$$\alpha_c = \Delta \rho_c / \Delta t_c,$$

где  $\Delta \rho_c$  — изменение реактивности, соответствующее изменению средней температуры графита  $\Delta t_c$ .

Коэффициент реактивности замедлителя существенным образом зависит от глубины выгорания топлива. Так, в реакторах РБМК-1000 в процессе перехода от начальной загрузки в режим установившихся перегрузок коэффициент  $\alpha_c$  изменяется от  $3 \cdot 10^{-5}$  до  $5 \cdot 10^{-5}$  1/°C [3].

**Эффект реактивности по температуре топлива.** На практике этот эффект называют мощностным. Температурный эффект реактивности по топливу обусловлен в основном эффектом Доплера. Для реакторов на тепловых нейтронах он всегда отрицателен. Изменение реактивности при изменении температуры топлива на 1 градус называют топливным коэффициентом реактивности, 1/°C:

$$\alpha_t = \Delta \rho_t / \Delta t_t,$$

где  $\Delta \rho_t$  — изменение реактивности, соответствующее изменению средней температуры топлива  $\Delta t_t$ .

В рабочей точке для реактора РБМК-1000 топливный коэффициент реактивности составляет  $-(1,0 \dots 1,5) \cdot 10^{-5}$  1/°C [3, 8].

**Паровой эффект реактивности.** Паровой эффект реактивности можно считать вторым мощностным эффектом, т. к. количество пара в а. з. определяется мощностью реактора и изменяется практически при неизменной температуре теплоносителя. Ниже записанное отношение принято называть паровым коэффициентом реактивности:

$$\alpha_\phi = \Delta \rho_\phi / \Delta \phi,$$

где  $\Delta \rho_\phi$  — изменение реактивности, соответствующее изменению среднего объемного паросодержания  $\Delta \phi$  в каналах реактора.

Расчетные и экспериментальные исследования показывают существенную зависимость парового коэффициента реактивности от глубины выгорания. Так, при номинальных параметрах реактора РБМК-1000 коэффициент  $\alpha_\phi$  меняется по кампании от  $-0,006$  до  $+0,018$  [1, 3].

**Баланс реактивности реактора РБМК.** Учитывая все вышесказанное, можно записать уравнение для оценки результирующего изменения запаса реактивности реактора РБМК в процессе его разгрузки, например с номинальной мощности:

$$\begin{aligned} \Delta \rho_{\text{зап}} &= \alpha_t (t_t - t_{t0}) + \alpha_c (t_c - t_{c0}) + \\ &+ \alpha_\phi (\phi - \phi_0) (\rho_{Xe} - \rho_{Xe0}), \end{aligned} \quad (5)$$

где индексом «0» обозначены номинальные значения соответствующих параметров реактора. Подобным образом можно оценить изменение запаса реактивности после перехода реактора с одного произвольного уровня мощности на другой.

### 3. Описание модели

Для решения задачи по обоснованию способов управления тепловым состоянием графитового замедлителя реактора РБМК-1000 и тем самым для воздействия на его реактивность был разработан код, составленный в системе объектно-ориентированного визуального программирования Delphi. Моделирующий код предназначен для расчета относительно медленных переходных процессов в реакторе РБМК-1000. Алгоритм, реализованный в программном коде, учитывает теплогидравлические процессы в активной зоне и в частности в графитовом замедлителе, а также нестационарное ксеноновое отравление, рассматриваемые в точечном приближении.

Исходя из поставленной задачи (исследование относительно медленных переходных процессов), изменение температуры топлива и паросодержания вычисляется с помощью статических зависимостей [4], а для описания нестационарного ксенонового отравления и температурного состояния графитового замедлителя используются дифференциальные уравнения. В уравнениях, описывающих динамику замедлителя, используются численные значения констант (коэффициенты влияния  $k_c$ ,  $k_0$ ; постоянные времени  $T$  по каналам тепловая мощность — температура графита, состав продувочного газа — температура графита), полученные в результате натурных опытов на реакторах РБМК-1000 (табл. 1).

Баланс реактивности в модели представляет собой алгебраическую сумму эффектов (5), обусловленных изменением всех определяющих параметров: паросодержания, температур топлива и графита.

Решения дифференциальных уравнений модели производилось методом Рунге—Кутты 4-го порядка.

Для проверки адекватности модели был проведен тестовый расчет теплового состояния графитового замедлителя с исходными данными реального эксплуатационного режима реактора: снижение тепловой мощности аппарата  $Q_p$  на 600 МВт при одновременном изменении содержания азота  $C_N$  в продувочном газе на 25...27 %. Результаты расчета и опытные точки представлены на рис. 2.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 2, указывает на удовлетворительное совпадение

(среднеквадратическое отклонение 3,4 °С) расчетных по модели данных с опытными точками и возможность ее использования для расчетных исследований.

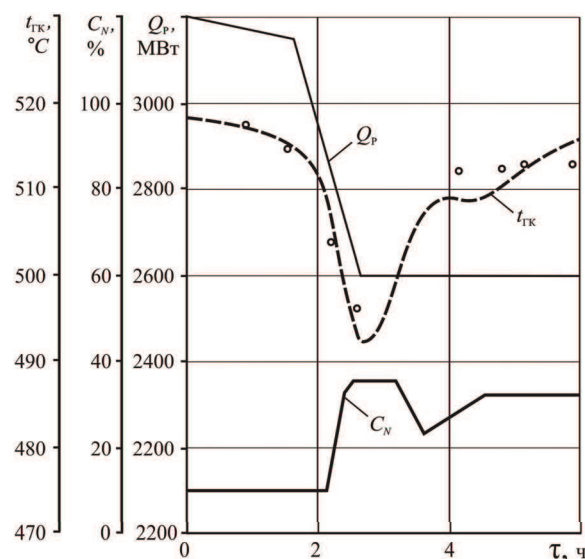


Рис. 2. Временное поведение параметров реактора РБМК-1000 в опыте с одновременным изменением тепловой мощности аппарата и состава продувочного газа: --- и — — расчеты по модели; o — опытные данные

### Выводы

1. Проведены исследования температурного режима кладки реактора РБМК при изменениях его мощности с использованием регулируемого состава продувочного газа.
2. На основе экспериментальных исследований определены статические (коэффициенты влияния) и динамические (времена запаздывания, постоянные времени) характеристики температурного состояния графитового замедлителя реактора РБМК-1000.
3. Установлено, что динамические параметры объекта при возмущении тепловыделения зависят от состава газовой среды. Рекомендовано использовать полученные характеристики для расчета медленных переходных процессов в реакторах РБМК.
4. Разработан программный код для инженерных расчетов интегральных характеристик, определяющих величину запаса реактивности установки с реактором РБМК-1000, в медленных переходных процессах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доллежал Н.А. Канальный ядерный энергетический реактор. — М.: Атомиздат, 1980. — 208 с.
2. Головацкий А.В., Нестеров В.Н., Шаманин И.В. Оптимальная температура эксплуатации графита для обеспечения проектной глубины выгорания ядерного топлива в реакторе ГТ-МГР // Известия Томского политехнического университета. — 2011. — Т. 319. — № 2. — С. 71–76.
3. Романенко В.С. Некоторые вопросы физики РБМК (обзор) // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. — 1981. — Вып. 5 (18). — С. 8–20.
4. Воробьев А.В. Управление составом газовой смеси, продуваемой через графитовую кладку реактора РБМК, для повышения надежности и эффективности его работы: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1988. — 20 с.
5. Способ регулирования мощности канального уран-графитового реактора: а.с. 1316448 Гос. Комитет СССР по делам изобр. и открытий / Воробьев А.В., Иванов В.А., Еперин А.П. и др.; заявитель и патентообладатель Ленинградский политехн. ин-т. — 08.02.1987.
6. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. — М.: Изд-во МЭИ, 2004. — 400 с.
7. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 352 с.
8. Гольцев А.О., Давыдова Г.Б., Давиденко В.Д. Влияние депрессии потока нейтронов в ячейке РБМК на величину максимальной и средней температуры топлива // Известия Томского политехнического университета. — 2009. — Т. 314. — № 4. — С. 5–7.

Поступила 01.02.2013 г.

УДК 534:621.32

## АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНАРНОЙ K<sub>r</sub>Cl-ЭКСИЛАМПЫ БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

Э.А. Соснин<sup>1,2</sup>, В.А. Панарин<sup>1</sup>, А.А. Пикулев<sup>3</sup>, В.Ф. Тарасенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

E-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

<sup>2</sup>Томский государственный университет

<sup>3</sup>Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, г. Саров

*Проведено экспериментальное и теоретическое исследование акустических характеристик планарной K<sub>r</sub>Cl-эксилампы барьерного разряда, заполненной смесью K<sub>r</sub>:Cl<sub>2</sub>=400:1 при давлении 20 кПа. Выполнены измерения спектра акустических колебаний колбы эксилампы. В экспериментах обнаружены резонансы на частотах 4,96; 5,36; 9,92; 10,80 и 21,60 кГц. Расчетным путем определены частоты собственных колебаний стенок колбы эксилампы и акустических колебаний в газе. Определена энергия акустических колебаний газа в зависимости от частоты колебаний стенок колбы. Сравнение результатов экспериментов и расчетов показало, что в области частот >10 кГц максимумы акустического сигнала совпадают с собственными частотами колебаний газа в колбе эксилампы.*

### Ключевые слова:

Эксилампа, барьерный разряд, акустические колебания.

### Key words:

Excilamp, dielectric barrier discharge, acoustic waves.

В последние два десятилетия источники спонтанного ультрафиолетового и вакуумного ультрафиолетового излучения связанно-свободных переходов эксимерных (R<sub>2</sub><sup>\*</sup>, X<sub>2</sub><sup>\*</sup>) или эксиплексных (RX<sup>\*</sup>) молекул, где R — инертные газы (Ar, Kr, Xe) а X — галогены (F, Br, Cl, I), стали объектом многих исследований и приложений (см. ссылки в [1]). Ключевыми вопросами в исследовании эксиламп сегодня являются вопросы обеспечения максимальной эффективности и надёжности устройства. Для изучения традиционно применяются три подхода: 1) оптический, с акцентом на регистрации и интерпретации спектральных и энергетических параметров излучения; 2) электрофизический, в котором моделью лампы служит эквивалентная схема, а объектом внимания являются величины тока и напряжения в системе; 3) плазмохимический, где основное внимание уделяется кинетике процессов в плазме, формирующейся в разрядном промежутке. Эти подходы, как правило, дополняют друг друга [2–4]

и позволяют получать ценную информацию о режимах работы прибора.

В [5, 6] был предложен новый подход для изучения баланса энергии в эксилампах, основанный на регистрации быстрой (характерное время ~100 мс) и медленной (~100 с) составляющих скачка давления, возникающего при включении, работе и выключении эксилампы. Газовая смесь здесь рассматривалась как термодинамическая система, повышение температуры которой происходит при постоянном объеме (изохорный процесс).

На основе обобщения экспериментальных данных в работах [5, 6] был сделан вывод, что амплитуда быстрой составляющей скачка давления характеризует часть вложенной энергии, которая термализуется в газе, а амплитуда медленной составляющей — энергию, расходуемую на нагрев колбы эксилампы. В рамках такого подхода за баланс энергии в эксилампе барьерного разряда (БР) отвечают четыре процесса: