

УДК 621.311.61

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КИСЛОТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

С.А. Саакян, М.К. Дарахчян

Национальный политехнический университет Армении

В результате теоретических и экспериментальных исследований в области химических источников энергии накоплены достаточные сведения и теоретические знания, на основе которых предложена модель структурных изменений пор пластин свинцовых кислотных аккумуляторных батарей (СКАБ), а также установлена связь между этими изменениями и свойствами разрядных характеристик. С учетом структурных изменений пор предложена математическая модель процесса разряда СКАБ для нестационарных режимов. В отличие от существующих методов, где идентификация математических описаний процесса разряда аккумуляторных батарей (АБ) осуществляется на основе нескольких разрядных характеристик, в данной работе дается способ идентификации на основе одной экспериментально снятой разрядной характеристики из условия минимума суммарного квадратичного отклонения. При этом экспериментальная разрядная характеристика снимается одноступенчатым снижением тока разряда. АБ сначала разряжается большим током в стационарном режиме, а затем продолжается разряд малым током. Установлены приближенные значения этих разрядных токов. Методом расчетных исследований определены участки и на них приближенное число экспериментальных данных, необходимых для обеспечения возможно приемлемой точности идентификации. Расчетно-экспериментальными исследованиями проведена оценка точности разработанной математической модели нестационарного процесса разряда.

Установлено, что неучет структурных изменений пор пластин СКАБ, в зависимости от тока разряда, является основной причиной неточности математических описаний процессов разряда. Показано, что существующие математические модели стационарных режимов являются частными случаями разработанной математической модели. По разработанной математической модели представлен расчетный метод оценки внутреннего сопротивления как в режимах эксплуатации, так и в режимах холостого хода с учетом предыстории процесса разряда.

Ключевые слова: энергия, кислотные источники, математическая модель, разрядные характеристики, уравнение, поляризация, внутреннее сопротивление.

Введение. Вопросам диагностики, оценки параметров аккумуляторных батарей, а также разработки расчетных методов определения их электрических и эксплуатационных характеристик посвящены ряд работ [1-3]. В [4-6] приведены разработанные математические модели процесса разряда АБ, т.е. уравнения разрядных характеристик. Однако они относятся к стационарным режимам разряда, т.е. когда сила разрядного тока остается неизменной. На практике при

эксплуатации АБ величины тока разряда не остаются постоянными, следовательно, существующие модели не могут быть использованы для оценки внутренних параметров источников.

В данной работе приводится уравнение разряда СКАБ для нестационарных режимов без учета модификационных изменений диоксида свинца и переходной составляющей концентрационной поляризации с целью оценки его электрических параметров.

Математическая модель. Уравнение разряда СКАБ можно представить в виде

$$U = E - C \int_0^t i(\tau) d\tau - i(t) \cdot R_0 - i(t) \cdot R_n + U_{np}, \quad (1)$$

где $i(t)$ - текущее значение тока разряда; $i(\tau)$ - процесс разрядного тока ($\tau = 0 \div t$); E - электродвижущая сила (ЭДС) полностью заряженного источника тока; U - напряжение; C - постоянный коэффициент; R_0 - сопротивление полностью заряженного источника; R_n - сопротивление поляризации; U_{np} - переходная составляющая концентрационной поляризации.

Задача сводится к отысканию аналитического выражения сопротивления поляризации (R_n), которое, как показывают эксперименты, зависит не только от емкости, отдаваемой источником тока, но и от текущего значения разрядного тока с учетом предыстории разряда. Следовательно, R_n необходимо искать в виде

$$R_n = F(q, i(t), f(i(\tau))),$$

где q - емкость, отдаваемая источником тока при разряде.

При разряде меняются как ЭДС, так и сопротивление поляризации АБ. Изменение ЭДС в СКАБ связано с изменением концентрации электролита, а изменение сопротивления поляризации - с изменением размеров и формы пор активных веществ пластин, которые меняются за счет образования сернокислого свинца, имеющего объем приблизительно в 1,92 раза больше, чем объем двуокиси свинца. Если допустить, что поры активных веществ пластин имеют цилиндрическую форму (рис.1), то при разряде источника сравнительно малыми токами диаметры пор по глубине сужаются равномерно, так как реагирующие вещества электролита успевают проникнуть в глубь пор, и токообразующие реакции протекают по всей площади. При этом емкость, отдаваемая источником тока, получается больше. При разряде сравнительно большими токами токообразующие реакции по глубине пор протекают неравномерно. У входа пор они больше, чем в глубине, за счет того, что реагирующие вещества не успевают проникнуть в глубь пор. Поэтому диаметр пор у входа получается меньшим, чем в глубине. Это, в свою очередь, приводит к ухудшению проникновения реагирующих веществ в поры. В результате уменьшается поверхность, а следовательно, и количество активных веществ пластин, участвующих в токообразующей реакции, что приводит к уменьшению емкости, отдаваемой АБ

при разряде ее до определенного конечного напряжения ($U = U_k$). Уменьшается также напряжение источника тока, что обусловлено увеличением плотности тока и уменьшением концентрации электролита у поверхности пластин. Из рис.1 видно, что теоретически процесс разряда прекращается при $d=0$. Следовательно, можно считать, что максимальная практическая емкость (Q) пропорциональна объему пор

$$Q = \alpha V_{пор},$$

где α - коэффициент пропорциональности, а емкость (q), отдаваемая источником тока при разряде, будет пропорциональна объему V_1 :

$$q = \alpha V_1.$$

Емкость $q_\phi = \alpha \cdot (V_1 + V_2)$ будем называть фиктивной.

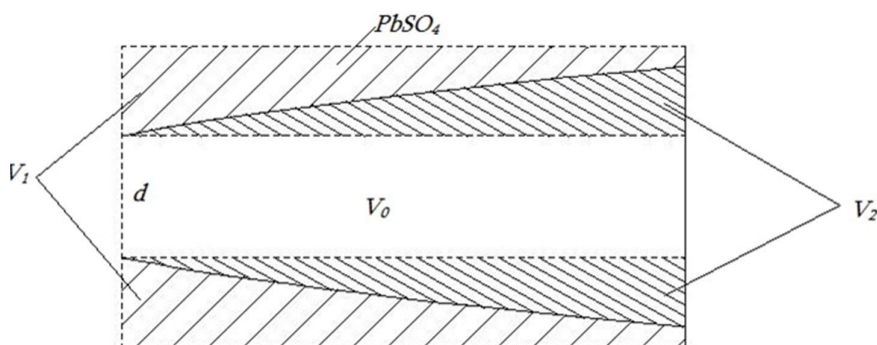


Рис.1. Схема структурных изменений пор пластин

Для определения фиктивной емкости предлагается следующее выражение:

$$q_\phi = \beta \cdot \int_0^t (i(\tau))^n d\tau, \quad (2)$$

где β - коэффициент пропорциональности ($|\beta|=1$); n - постоянное вещественное число ($n > 1$).

Примем, что сопротивление поляризации увеличивается с увеличением фиктивной емкости, так как оба значения увеличиваются в течение разряда. Однако при постоянном значении фиктивной емкости сопротивление поляризации зависит также от соотношения объемов V_1 и V_2 . Поэтому можно предполагать, что сопротивление поляризации пропорционально выражению

$$R_n \equiv \int_0^t (i(\tau))^m d\tau, \quad (3)$$

где m - постоянное вещественное число.

Разрядные кривые СКАБ в конце разряда резко падают, т.е. сопротивление поляризации стремится к бесконечности. Так как процесс разряда теоретически

прекращается при $d \rightarrow 0$, т.е. когда остаточная емкость (q_o), определяемая выражением

$$q_o = Q - q_\phi = \alpha(V_n - V_1 - V_2),$$

стремится к нулю, то можно предполагать, что сопротивление поляризации возрастает с уменьшением остаточной емкости:

$$R_n \equiv 1/(Q - q_\phi). \quad (4)$$

Известно [5], что при увеличении тока разряда внутреннее сопротивление СКАБ уменьшается и стремится к определенной постоянной величине. Эта величина в (1) равна R_0 . Следовательно, можно считать, что сопротивление поляризации также обратно пропорционально степени тока разряда:

$$R_n \equiv 1/(i(t))^p, \quad (5)$$

где p - постоянное вещественное число.

На основе (2)-(5) получаем следующее выражение для оценки сопротивления поляризации:

$$R_n = \frac{K \cdot \int_0^t (i(\tau))^m d\tau}{(i(t))^p \cdot (Q - \int_0^t (i(\tau))^n d\tau)}, \quad (6)$$

где K - коэффициент пропорциональности.

С учетом (6) уравнение (1) примет вид

$$U = E - C \cdot \int_0^t i(t) dt - i(t) \cdot R_0 - i(t) \cdot \frac{K \cdot \int_0^t (i(t))^m dt}{(i(t))^p \cdot (Q - \int_0^t (i(t))^n dt)}. \quad (7)$$

Если в (7) принять $i(t) = I = const$, то получим уравнение разрядных характеристик для стационарных режимов:

$$U = E - C \cdot q - I \cdot R_0 - I \cdot \frac{K \cdot I^{(m-p-1)} \cdot q}{Q - I^{(n-1)} \cdot q}. \quad (8)$$

Постоянные параметры E, C, R_0, K, m, p, Q, n в уравнении (7) могут быть определены из условия минимума суммарного квадратичного отклонения экспериментально и аналитически определенных по уравнению (7) разрядных кривых. Экспериментальная разрядная характеристика снимается при одноступенчатом снижении тока разряда. Источник вначале разряжается током наиболее сильного режима ($I_1 \approx |Q_H|A$), а затем разряд продолжается в наиболее слабом режиме ($I_2 \approx 0,1 \cdot |Q_H|A$). На рис.2 приведены разрядные характеристики СКАБ 6СТ-78, снятые указанным способом при поддержке температуры постоянной, полагая I_1 и I_2 соответственно равными 70 и 10 А [7].

Рабочему диапазону АБ в основном соответствует начальный линейный участок разрядной характеристики. Поэтому точность описания этого участка уравнением разряда (7) должна быть высокой. Конечный участок разрядной характеристики, в основном, обусловлен переменной составляющей сопротивления поляризации. Точность описания процесса разряда при переходе от одного режима к другому во многом зависит от точности переменной составляющей сопротивления поляризации. Уравнение (7) должно достаточно точно описать процесс разряда как на начальном, так и на конечном участках разрядной характеристики.

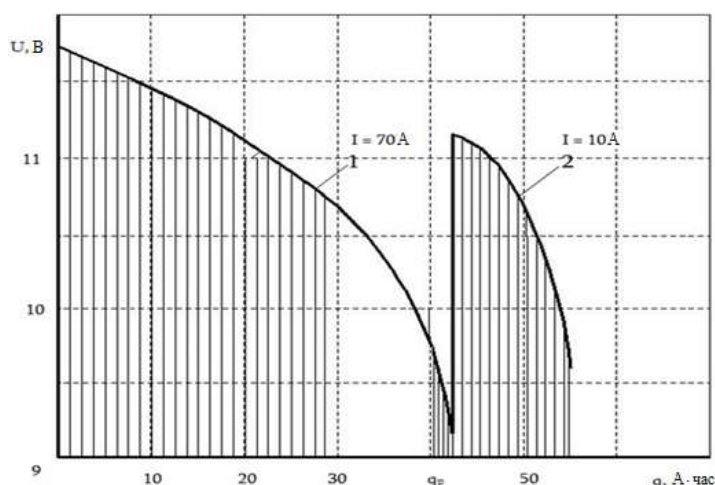


Рис.2. Разрядная характеристика СКАБ 6СТ-78

Эксперименты показали, что целесообразно на конечном участке кривой 1 и кривой 2 (рис.2) взять приблизительно одинаковое количество точек (по N) через определенные интервалы Δq_{1k} и Δq_2 , а на начальном линейном участке кривой 1 - приблизительно в два раза больше точек через интервал Δq_1 . Суммарное квадратичное отклонение (S) при этом определяется выражением

$$S = \sum_{i=1}^{3N} \left(E - C \cdot q_i - I_1 \cdot R_0 - I_1 \cdot \frac{K \cdot I_1^{m-1} \cdot q_i}{I_1^p \cdot (Q - I_1^{n-1} \cdot q_i)} - U_i \right)^2 + \sum_{i=3N+1}^{4N} \left(E - C \cdot q_i - I_2 \cdot R_0 - I_2 \cdot \frac{K \cdot (I_1^{m-1} \cdot q_n + I_2^{m-1} \cdot (q_i - q_n))}{I_2^p \cdot (Q - (I_1^{n-1} \cdot q_n + I_2^{n-1} \cdot (q_i - q_n)))} - U_i \right)^2, \quad (9)$$

где q_n - значение емкости, при котором меняется режим разряда (на рис.2 $q_n = 43 \text{ A} \cdot \text{час}$); U_i - величины напряжения АБ при значениях разрядной емкости q_i ; I_1, I_2 - токи разряда.

Расчетно-экспериментальные исследования. Результаты решения задачи (9) в среде MATLAB следующие: $E = 12,576 \text{ В}$, $C = 0,013 \text{ В/А} \cdot \text{час}$, $R_0 = 0,01 \text{ Ом}$, $Q = 96 \text{ А} \cdot \text{час}$, $n = 1,1165$, $m = 1,4663$, $K = 0,0108 \text{ Ом}$, $p = 0,35$.

На рис.3 приведены экспериментальные и аналитически построенные согласно (7) разрядные характеристики. Результаты показывают, что уравнение (7) достаточно точно описывает процесс разряда кислотных источников энергии.

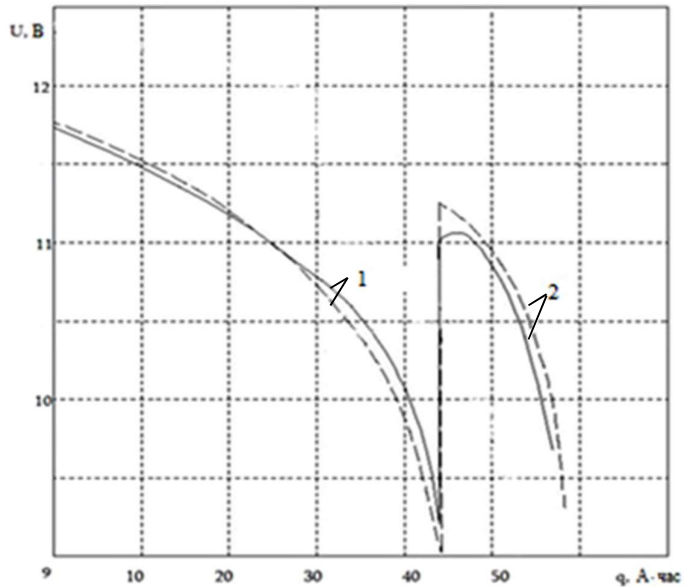


Рис.3. Разрядные кривые АКБ 6СТ-78: ——— - экспериментальные, - - - - - расчетные; 1- $I = 70 \text{ А}$, 2- $I = 10 \text{ А}$

В настоящее время часто для стационарных режимов пользуются уравнением Шеферда [4], которое имеет вид

$$U = E - C \cdot q - I \cdot R_0 - I \cdot \frac{K \cdot q}{Q - q}, \quad (10)$$

где E, C, R_0, K, Q - постоянные для данного источника параметры.

Фактически в (10) не учтены структурные изменения пор активных веществ пластин в зависимости от режима разряда. Именно по этой причине неточность описания разрядных характеристик СКАБ по уравнению (10) получается большой.

Уравнение Шеферда для СКАБ 6СТ-78 имеет вид [7]

$$U = 12,53 - 0,008 \cdot q - 0,0065 \cdot I - I \cdot \frac{0,0249 \cdot q}{78,66 - q}. \quad (11)$$

На рис.4 приведены экспериментально и аналитически определенные по выражениям (8) и (11) разрядные характеристики.

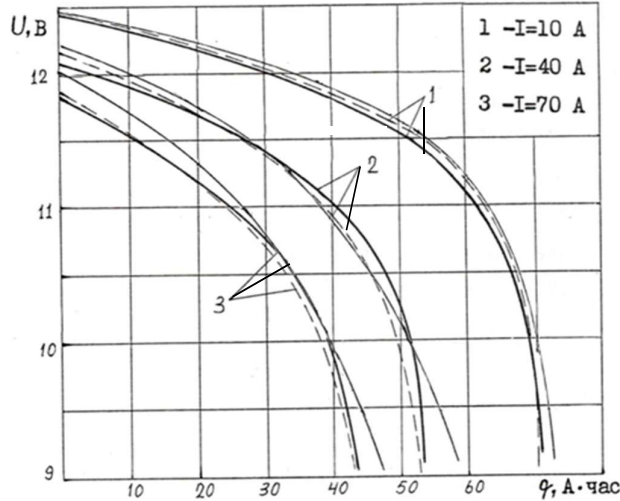


Рис.4. Разрядные кривые АБ 6СТ-78: ——— - экспериментальные, - - - - - расчетные согласно (8), — · — · — расчетные согласно (11)

Из рис.4 видно, что уравнение (8) более точно описывает процесс разряда по сравнению с уравнением Шеферда.

Оценка внутреннего сопротивления. С учетом (6) и (7) внутреннее сопротивление АБ (R_B) можно определить выражением

$$R_B = R_0 + \frac{K \cdot q_{n1}}{i(t)^p (Q - q_{n2})}, \quad (12)$$

где $i(t)$ - текущее значение тока разряда; $q_{n1} = \int_0^t (i(\tau))^m d\tau$; $q_{n2} = \int_0^t (i(\tau))^n d\tau$.

В режиме холостого хода внутреннее сопротивление АБ определяется также выражением (12), при этом вместо $i(t)$ необходимо учесть значение предполагаемого рабочего тока (I):

$$R_B = R_0 + \frac{K \cdot q_{n1}}{I^p (Q - q_{n2})}.$$

Выводы

1. Разработаны модель структурных изменений пор пластин СКАБ и математическая модель процесса разряда для нестационарных режимов. Дан способ идентификации математической модели на основе одной экспериментально снятой разрядной характеристики.
2. Расчетно-экспериментальным путем установлены преимущество и точность разработанной математической модели.

3. Предлагается метод оценки внутреннего сопротивления СКАБ как в процессе разряда, так и в режимах холостого хода с учетом предыстории процесса разряда.

Литература

1. **Таганова А.А.** Диагностика герметичных химических источников тока. - СПб.: Химиздат, 2007. – 128 с.
2. **Чупин Д.П.** Метод оценки параметров аккумуляторных батарей // Материалы Всероссийской науч.-практ. конф. ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвященной 15- летию ИРСИД. – Омск: Изд-во КАН, 2012. – С.205-207.
3. **Scrosati V.C.A.** Modern Batteries. An Introduction to Electrochemical Power Sources. - 2nd ed. - London: Arnold; N. Y.: Willey, 1997. - 351 p.
4. **Shepherd C.M.** Design of primary and secondary cells. 1. An equation describing battery discharge // J. Electroch. Soc. – 1965.- Vol. 112, N7.- P.657-664.
5. **Романов В.В., Хашев Ю.М.** Химические источники тока. -М.: Советское радио, 1978. -263 с.
6. **Саакян С.А.** Аналитическое представление разрядных характеристик кислотных источников тока при постоянной силе разрядного тока // Известия АН АрмССР. Сер. ТН.- 1987.-Т. XV, N4. – С.44-47.
7. Разработка и создание частотно-управляемого асинхронного электропривода электромобиля НАМИ: Отчет по НИР ЕрПИИ х/д, ГР 72047013 инв. N Б699229.- Ереван, 1977. -141 с.

Поступила в редакцию 29.08.2017.

Принята к опубликованию 13.12.2017.

ԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ԹԹՎԱՅԻՆ ԱՂԲՅՈՒՐՆԵՐԻ ԷԼԵԿՏՐՈԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈՂԵԼԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ

Ս.Ա. Սահակյան, Մ.Կ. Դարախչյան

Էներգիայի քիմիական աղբյուրների բնագավառում տեսական և փորձնական հետազոտությունների արդյունքում կուտակված են բավարար քանակությամբ տվյալներ և տեսական գիտելիքներ, որոնց հիման վրա առաջարկված է կապարաթթվային ակումուլյատորային մարտկոցների (ԿԹԱՄ) թիթեղների ծակոտիների կառուցվածքային փոփոխությունների մոդել, ինչպես նաև հաստատված է այդ փոփոխությունների և լիցքաթափման բնութագրերի հատկությունների միջև կապը: Հաշվի առնելով ծակոտիների կառուցվածքային փոփոխությունները՝ առաջարկված է ԿԹԱՄ-ի լիցքաթափման ոչ ստացիոնար գործընթացների մաթեմատիկական մոդել: Ի տարբերություն գոյություն ունեցող մեթոդների, որոնց համաձայն՝ ակումուլյատորային մարտկոցների (ԱՄ) լիցքաթափման գործընթացի մաթեմատիկական նկարագրության նույնականացումն իրականացվում է մի քանի լիցքաթափման բնութագրերի հիման վրա, այս աշխատանքում տրվում է նույնականացման միջոց մեկ փորձնական ստացված լիցքաթափման բնութագրի հիման վրա՝ գումարային քառակուսային շեղման նվազագույնի պայմանից: Այս դեպքում փորձնական լիցքաթափման բնութագիրը ստացվում է լիցքաթափման հոսանքի միաստիճան իջեցմամբ: ԱՄ-ն սկզբում ստացիոնար

գործընթացում լիցքաթափվում է մեծ հոսանքով, իսկ այնուհետև լիցքաթափումը շարունակվում է փոքր հոսանքով: Ամրագրված են լիցքաթափման այդ հոսանքների մոտավոր արժեքները: Հաշվարկային հետազոտությունների մեթոդով որոշված են տեղամասերը և դրանց վրա փորձնական տվյալների մոտավոր քանակը, որոնք անհրաժեշտ են նույնականացման հնարավոր ընդունելի ճշգրտության ապահովման համար: Հաշվարկա-փորձնական հետազոտություններով իրականացված է ոչ ստացիոնար լիցքաթափման գործընթացների համար մշակված մաթեմատիկական մոդելի ճշտության գնահատումը:

Հիմնավորված է, որ ԿԹԱՄ-ներում լիցքաթափման հոսանքից կախված թիթեղների ծակոտիների կառուցվածքային փոփոխությունների անտեսումը լիցքաթափման գործընթացների մաթեմատիկական նկարագրությունների անճշտության հիմնական պատճառն է: Ցույց է տրված, որ ստացիոնար գործընթացների գոյություն ունեցող մաթեմատիկական մոդելները մշակված մոդելի մասնավոր դեպքերն են: Ըստ մշակված մաթեմատիկական մոդելի՝ ներկայացված է ներքին դիմադրության գնահատման հաշվարկային մեթոդ, ինչպես շահագործման, այնպես էլ պարապ ընթացքի գործընթացներում՝ հաշվի առնելով լիցքաթափման նախապատմությունը:

Առանցքային բաներ. էներգիա, թթվային աղբյուրներ, մաթեմատիկական մոդել, լիցքաթափման բնութագրեր, հավասարում, բևեռացում, ներքին դիմադրություն:

ESTIMATING THE ELECTRICAL PARAMETERS OF ACIDIC POWER SOURCES BASED ON THE MATHEMATICAL MODEL

S.A. Sahakyan, M.K. Darakhchyan

As a result of theoretical and experimental investigations, considerable information and theoretical knowledge are accumulated in the field of chemical energy sources based on which, a model of structural modifications of plate pores of lead-acid accumulator batteries (LAAB) is proposed, as well as the relation between those modifications and properties of discharge characteristics is established. A mathematical model of the LAAB discharge process for non-stationary modes is proposed, taking into account the structural changes of pores. Unlike the existing methods, in which the identification of mathematical descriptions of the discharge process of accumulator batteries (AB) is carried out on the basis of several discharge characteristics, in this paper, we give an identification method under the minimum squared deviation condition based on one experimentally taken discharge characteristic. In this case, the experimental discharge characteristic is taken by one-step reduction of the discharge current. At first AB is discharged by a large current in the stationary mode, and then the discharge continues by a small current. Approximate values of these discharge currents are established. The areas and, on them, the approximate number of experimental data necessary to ensure the possible acceptable accuracy of identification are determined by the calculation-research method. The evaluation of accuracy of the developed mathematical model of the non-stationary discharge process is carried out by calculation-experimental investigations.

It has been established that the neglect of the structural modifications of LAAB plate pores, depending on the discharge current, is the main reason for the inaccuracy of mathematical descriptions of discharge processes. It is shown that the existing mathematical models for stationary modes are particular cases of the developed mathematical model. According to the latter, a calculation method for estimating the internal resistance is presented both in exploitation and in idle modes, taking into account the pre-history of the discharge process.

Keywords: energy, acid sources, mathematical model, discharge characteristics, equation, polarization, internal resistance.