

УДК 621.355

**УСКОРЕННЫЙ МЕТОД ЗАРЯДА СВИНЦОВО-КИСЛОТНОГО АККУМУЛЯТОРА.  
4. ИМПУЛЬСНЫЙ ЗАРЯД АСИММЕТРИЧНЫМ ТОКОМ, ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ И РЕСУРС**

**Ю. Б. Каменев, Н. И. Чунц**

*Закрытое акционерное общество «Электротяга»  
198095, Россия, Санкт-Петербург, Калинина 50а*

✉ E-mail: kamenev.y.b@mail.ru

Поступила в редакцию: 12.03.2020 / Принята: 03.07.2020 / Опубликовано: 30.09.2020

Данная работа завершает серию статей, посвященных проблеме ускоренного процесса заряда свинцово-кислотного аккумулятора. В настоящей статье исследовалась возможность повышения эффективности заряда за счет применения асимметричного тока на второй ступени. Кроме того, исследовалось влияние использования ускоренных режимов заряда на ресурс, допустимое число подряд проведенных циклов и газовыделение.

*Ключевые слова:* свинцово-кислотный аккумулятор, ускоренный заряд.

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

**Accelerated Model of Charging of Lead-Acid Batteries.**

**4. Pulse Charge with Asymmetrical Current, Gas Evolving and Service Life**

Yury B. Kamenev, <https://orcid.org/000-0001-6990-0005>, Kamenev.y.b@mail.ru  
Nataliya I. Chunts, <https://orcid.org/000-0002-3497-4992>, chunts50@mail.ru

*Joint Stock Company «ELECTROTYAGA»  
50a Kalinina St., 198055 Saint Petersburg, Russia*

Received: 12 March 2020 / Accepted: 03 July 2020 / Published: 30 September 2020

This paper is the conclusion to the series of the articles devoted to the problem of accelerated charging of a lead-acid battery. In this paper we investigated the possibility of increasing the charge efficiency by applying the asymmetric current at the second stage. In addition, the effect of using admissible charging rates on the resource, the admissible number of consecutive cycles, and gas release were studied.

*Keywords:* lead acid battery, boost charge.

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

**DOI:** <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2020-20-3-146-156>

Окончание (см. 2013. Т. 13, № 2. С. 77–82).

**ВВЕДЕНИЕ**

Одним из основных недостатков свинцово-кислотного аккумулятора (СКА) является длительность его заряда, составляющая в среднем 12–15 ч. Такая продолжительность заряда определяется в основном низкой эффективностью использования тока при заряде от 80 до 100%-ной степени заряженности [1–3]. Эффективность заряда

в указанном диапазоне степеней заряженности составляет 5–10%. Было показано [1–3], что до 80%-ной степени заряженности СКА может быть заряжен достаточно быстро, примерно за 0.5–1.5 ч. Японские исследователи зарядили СКА до 80%-ной степени заряженности за 10–15 мин [3]. Таким образом, задача реализации ускоренного заряда может быть решена за счёт повышения эффективности заряда СКА на последнем этапе, например, за счёт применения импульсных зарядных токов [1–3].

В работах [4–7] был предложен режим ускоренного заряда свинцово-кислотных аккумуляторов, включающий этап гальваностатического ступенчатого заряда до 80%-ной степени заряженности и последующий заряд импульсным током до 100%-ной степени заряженности. В этих работах было исследовано влияние режима гальваностатического заряда на циклируемость СКА и показано, что применение больших токов на первой ступени заряда способствует повышению ресурса положительной активной массы (ПАМ) и снижению ресурса отрицательной активной массы (ОАМ), что находится в соответствии с результатами работ Д. Павлова [6, 8, 9]. Была подтверждена возможность заряда СКА до 80%-ной степени заряженности за 0.5 ч при небольшом снижении ресурса аккумуляторов. Максимальный ресурс аккумуляторов был получен при длительности заряда на первом этапе равной 1.5 ч.

В работе [10] были изучены различные режимы одноступенчатого и двухступенчатого гальваностатического зарядов и дана оценка влияния этих режимов на коэффициент эффективности заряда и разогрев аккумулятора. Полученные данные позволили сделать обоснованный выбор параметров первого гальваностатического этапа ускоренного заряда.

В работе [5] был исследован процесс импульсного заряда аккумуляторов, предварительно заряженных в гальваностатическом режиме до 80%-ной степени заряженности. При этом использовался импульсный  $0.8C_{НОМ}$  заряд, представляющий собой чередование зарядных импульсов и пауз. Было изучено влияние на эффективность заряда и разогрев аккумуляторов основных параметров импульсного заряда, таких как амплитуда, длительность зарядных импульсов, длительность паузы, общая продолжительность импульсного заряда.

В настоящей работе исследовано влияние параметров разрядного импульса (амплитуда, длительность) на эффективность импульсного заряда асимметричным током,

включающего последовательное протекание зарядного импульса, паузы и разрядного импульса.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Выбор параметров импульсного заряда с применением асимметричного тока*

При испытаниях использовали макеты наливных свинцовых аккумуляторов с номинальной ёмкостью 4.5–4.7 А·ч. В аккумуляторах применялась кислота плотностью 1.28 г/см<sup>3</sup>. Макеты состояли из одного положительного и двух отрицательных электродов. Зарядно-разрядные операции, за исключением импульсного заряда, проводили с использованием зарядно-разрядного комплекса УЗРИ 5А-18В (Россия), а импульсный заряд – с использованием потенциостата ELINS P-150I (ООО «Элипс», Россия).

Алгоритм испытаний асимметричным импульсным током включал следующие этапы:

- 1) 2-ступенчатый гальваностатический заряд до 80%-ной степени заряженности; ток 1-й ступени –  $0.8C_{НОМ}$  до переходного напряжения 2.47 В; ток 2-й ступени –  $0.5C_{НОМ}$  до 80%-ной степени заряженности;
- 2) импульсный заряд с параметрами: ток импульсного заряда ( $I_{ЗИ}$ ) –  $0.75C_{НОМ}$ ; длительность импульсного заряда ( $t_{ЗИ}$ ) – 200 мс; длительность паузы ( $t_{ПАУЗ}$ ) – 40 и 50 мс (при нулевой длительности разрядного импульса); ток разрядного импульса ( $I_{РИ}$ ) – 0.75, 0.90, 1.05, 1.25 $C_{НОМ}$ ; длительность разрядного импульса ( $t_{РИ}$ ) – 0, 5, 10, 25 мс; общая длительность импульсного заряда ( $t_{ИМП}$ ) – 10, 20, 30 мин;
- 3) контрольный разряд проводили током  $0.1C_{НОМ}$  до конечного напряжения 1.8 В.

На рис. 1 показано изменение напряжения в процессе импульсного заряда. Импульсный заряд состоял из чередования зарядного импульса с амплитудой  $0.75C_{НОМ}$  длительностью 200 мс, паузы длительно-

стью 40 мс, разрядного импульса с амплитудой  $1.05C_{НОМ}$  длительностью 10 мс.

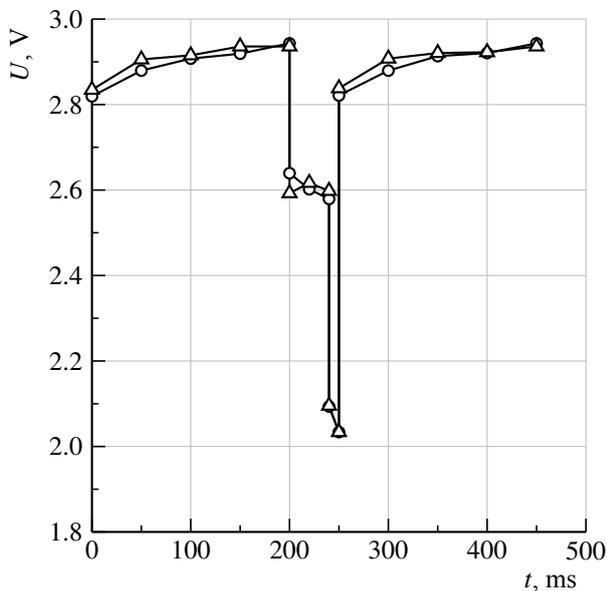


Рис. 1. Изменение напряжения в процессе импульсного заряда. Режим заряда:  $I_{ЗИ} = 0.75C_{НОМ}$ ,  $t_{ЗИ} = 200$  мс,  $t_{ПАУЗ} = 40$  мс,  $I_{РИ} = 1.05C_{НОМ}$ ,  $t_{РИ} = 10$  мс. Длительность импульсного разряда, предшествующая измерению, 9 (○) и 10 мин (△)

Fig. 1. Voltage change during the pulse charge. Charge mode:  $I_{cp} = 0.75C_{Rated}$ ,  $t_{cp} = 200$  ms,  $t_{pause} = 40$  ms,  $I_{dp} = 1.05C_{Rated}$ ,  $t_{dp} = 10$  ms. The duration of the pulse discharge preceding the measurement is 9 (○) and 10 minutes (△)

В процессе заряда свинцового аккумулятора имеет место увеличение концентрации кислоты. Рост плотности кислоты связан с медленной скоростью её диффузии из глубины активной массы в объём электролита, что приводит к торможению процесса заряда как положительной (ПAM), так и отрицательной (ОAM) активных масс. Во время паузы происходит снижение плотности кислоты в реакционной зоне за счёт протекания диффузионных процессов. В первом приближении можно оценить изменение плотности электролита в течение паузы по значению НРЦ, измеренному в начале и в конце паузы, в соответствии с уравнением (1) [11]:

$$d = \text{НРЦ} - 0.84, \quad (1)$$

где  $d$  – плотность электролита, г/см<sup>3</sup>, НРЦ – напряжение разомкнутой цепи, В.

Из рис. 1 следует, что в момент перехода из заряда на паузу, когда ток равен нулю, напряжение равно 2.60 В, что в соответствии с уравнением (1) отвечает плотности кислоты, равной 1.76 г/см<sup>3</sup>. За время паузы (40 мс) напряжение снижается до 2.58 В, что отвечает плотности кислоты примерно 1.74 г/см<sup>3</sup>. Скорость снижения плотности кислоты за время паузы (40 мс) составляет  $5 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>·мс. Следует понимать, что указанные плотности кислоты отвечают не плотности её в объёме аккумулятора, а некоторой условной плотности кислоты в реакционной зоне на границе электрод/раствор, определяющей значения потенциалов электродов. Таким образом, дана приближенная оценка плотности кислоты в макропорах заряженных активных масс.

Для оценки изменения плотности кислоты за время разрядного импульса были определены значения НРЦ в конце паузы, непосредственно перед началом разрядного импульса и в паузе, длительностью 1 мс, сделанной в конце разрядного импульса, непосредственно перед переходом с разрядного к зарядному импульсу. Перед разрядным импульсом НРЦ составляло 2.58 В, а в паузе между разрядным и зарядным импульсами 2.49 В. Таким образом, за период разрядного импульса плотность кислоты снизилась с 1.74 до 1.64 г/см<sup>3</sup>. При этом скорость изменения плотности кислоты в процессе разрядного импульса составила  $0.010$  г/см<sup>3</sup> × мс, т. е. в 20 раз превысила скорость изменения плотности кислоты в паузе.

Снижение плотности кислоты в реакционной зоне при проведении разрядного импульса может быть связано с тремя причинами. Во-первых, за счёт протекания разрядного процесса, идущего с потреблением кислоты. Во-вторых, за счёт появления миграционной составляющей переноса ионов. И, наконец, для положительного электрода за счёт изменения знака заряда поверхности ПAM. Потенциал нулевого заряда диоксида свинца равен 1.8 В (здесь и далее потенциалы даны относительно н.в.э.). Равновесный потенциал положительного электро-

да в кислоте плотностью 1.28 г/см<sup>3</sup> составляет 1.79 В. Следовательно, в импульсном заряде потенциал PbO<sub>2</sub> электрода смещается в область, положительную по отношению к потенциалу нулевого заряда, и, соответственно, поверхность заряжена положительно. Это приводит к электростатическому притяжению ионов кислоты HSO<sub>4</sub><sup>-</sup> и росту её поверхностной концентрации. Последнее тормозит процесс заряда. В процессе протекания разрядного импульса потенциал положительного электрода смещается в область отрицательнее значения потенциала нулевого заряда, что определяет отрицательный заряд поверхности положительного электрода. В этом случае анионы кислоты будут отталкиваться от поверхности, что должно способствовать снижению их концентрации в реакционной зоне и росту эффективности заряда на последующем зарядном импульсе. Данный процесс не реализуется на отрицательном электроде, так как его равновесный потенциал равен -0.336 В, потенциал нулевого заряда свинца, соответственно, -0.69 В. В этом случае во всём рабочем диапазоне потенциалов отрицательного электрода его поверхность заряжена положительно.

Помимо снижения плотности кислоты в реакционном слое, положительное влияние разрядного импульса на эффективность заряда связано ещё и с тем, что в процессе разряда нарушается сплошность заряженной активной массы, покрывающей ещё не прореагировавший разряженный материал. Это способствует проникновению кислоты к последнему и протеканию реакций его заряда. Описанный эффект используют при формировке электродов, когда после заряда дается неглубокий разряд. После разряда электроды вновь заряжают. Такой алгоритм заряда повышает его эффективность в целом за счёт более глубокого проникновения кислоты в глубь разряженной активной массы.

Таким образом, использование разрядного импульса создаёт в реакционной зоне условия, повышающие эффективность заряда в следующем за ним зарядном импульсе.

На рис. 2 показана зависимость разрядной ёмкости макетов аккумуляторов, полученной непосредственно после проведения импульсного заряда, от амплитуды разрядного импульса и продолжительности импульсного заряда. Видно, что зависимость

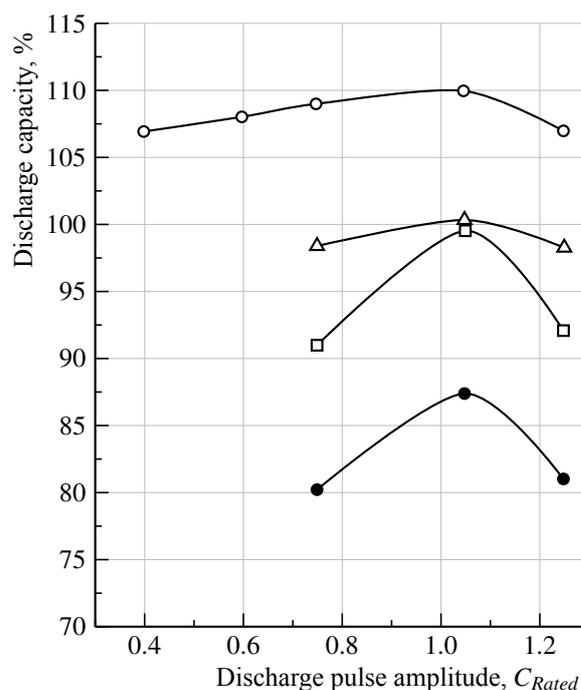


Рис. 2. Зависимость разрядной емкости от амплитуды разрядного импульса. Длительность импульсного заряда, мин: 10 (●), 20 (Δ), 30 (□), 40 (○)

Fig. 2. Dependence of the discharge capacity on the amplitude of the discharge pulse. Pulse charge duration, min: 10 (●), 20 (Δ), 30 (□), 40 (○)

носит экстремальный характер, что указывает на действие как минимум двух факторов, противоположно влияющих на эффективность заряда. С одной стороны, как было отмечено выше, разрядный импульс повышает эффективность заряда, но, с другой стороны, рост его амплитуды повышает разрядную ёмкость, что при постоянной длительности заряда приводит к снижению общей зарядной ёмкости, передаваемой аккумуляторам за время импульсного заряда ( $t_{имп}$ ). Зарядная ёмкость ( $Q_{зар}$ ) может быть представлена соотношением

$$Q_{зар} = [\theta \cdot I_{зи} \cdot t_{зи} - I_{ри} \cdot t_{ри}] \cdot \frac{t_{имп}}{t_{зи} + t_{пауз} + t_{ри}} \quad (2)$$

где  $\theta$  – коэффициент использования зарядного тока,  $I_{зи}$ ,  $I_{ри}$  – токи зарядного и разрядного импульсов,  $t_{зи}$ ,  $t_{пауз}$ ,  $t_{ри}$  – длительности зарядного импульса, паузы, разрядного импульса. Из (2) следует, что при небольших амплитудах разрядного импульса прирост зарядной ёмкости будет определяться увеличением коэффициента использования зарядного тока. При достижении определенного значения амплитуды разрядного импульса рост разрядной ёмкости превысит положительный эффект от использования разрядного импульса.

На рис. 3 представлены зависимости разрядной ёмкости макетов аккумуляторов от длительности разрядного импульса и общей продолжительности импульсного заряда. Видно, что на протяжении всего импульсного заряда максимальной его эффективности соответствует длительность разрядного импульса, равная 10 мс. Очевидно,

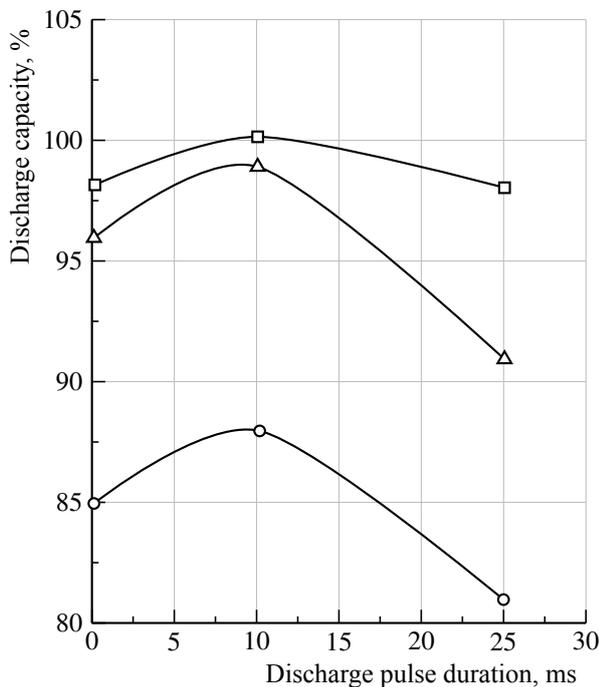


Рис. 3. Влияние длительности разрядного импульса и продолжительности импульсного заряда на разрядную ёмкость макетов аккумулятора. Длительность импульсного заряда, мин: 10 (○), 20 (△) и 30 (□)

Fig. 3. Influence of the discharge pulse duration and the pulse charge duration on the discharge capacity of the battery models. Pulse charge duration, min: 10 (○), 20 (△) and 30 minutes (□)

что при длительности разрядного импульса менее 10 мс эффективность от его использования превышает сокращения суммарной длительности заряда. И наоборот, при увеличении длительности разрядного импульса более чем 10 мс определяющим становится сокращение длительности заряда.

Таким образом, исследовано влияние амплитуды и длительности разрядного импульса на эффективность импульсного заряда асимметричным током. Показано, что применение разрядного импульса приводит к снижению концентрации кислоты в зоне токообразующих реакций, что повышает эффективность заряда. Отмечено, что зависимость эффективности заряда от амплитуды и длительности разрядного импульса носит экстремальный характер, что позволяет оптимизировать режим заряда.

#### *Влияние ускоренного режима заряда на ресурс и газовыделение свинцовых аккумуляторов*

Выше нами были предложены ускоренные методы заряда свинцово-кислотного аккумулятора, включающие 2-ступенчатый гальваностатический заряд до 80%-ной степени заряженности и импульсные заряды симметричным и асимметричными токами до 100%-ной степени заряженности. Было исследовано влияние параметров такого заряда на его эффективность. В качестве параметров оптимизации были рассмотрены: 1) ток зарядного импульса; 2) длительность зарядного импульса; 3) длительность паузы между зарядными импульсами; 4) продолжительность импульсного заряда симметричным током; 5) ток разрядного импульса; 6) длительность разрядного импульса; 7) продолжительность импульсного заряда асимметричным током.

На основании полученных результатов были предложены режимы ускоренных зарядов с применением симметричного и асимметричного импульсных токов. Оптимизация токов 1-й и 2-й ступеней заряда была проведена ранее [4]. Схемы ускоренных

зарядов представлены на рис. 4, а схема серийного заряда – на рис. 5.

Средняя продолжительность серийного заряда свинцовых аккумуляторов составляла 12–17 ч, а ускоренных зарядов – 2 ч. Таким образом, применение предложенных ускоренных режимов заряда позволяет в 6–7 раз сократить длительность заряда.

Ранее отмечалось [4], что режим заряда существенно влияет на структурно-фазовые характеристики активных масс, га-

зовыделение, разброс аккумуляторов в составе батарей по емкости и т. д. Всё это в совокупности определяет ресурсные характеристики свинцово-кислотного аккумулятора (СКА). Было исследовано влияние предлагаемых ускоренных режимов заряда на ресурсные характеристики СКА. Испытаны аккумуляторы, имеющие номинальную емкость 12 А·ч.

Испытания включали два этапа: 1) этап набора емкости и 2) этап непрерывного

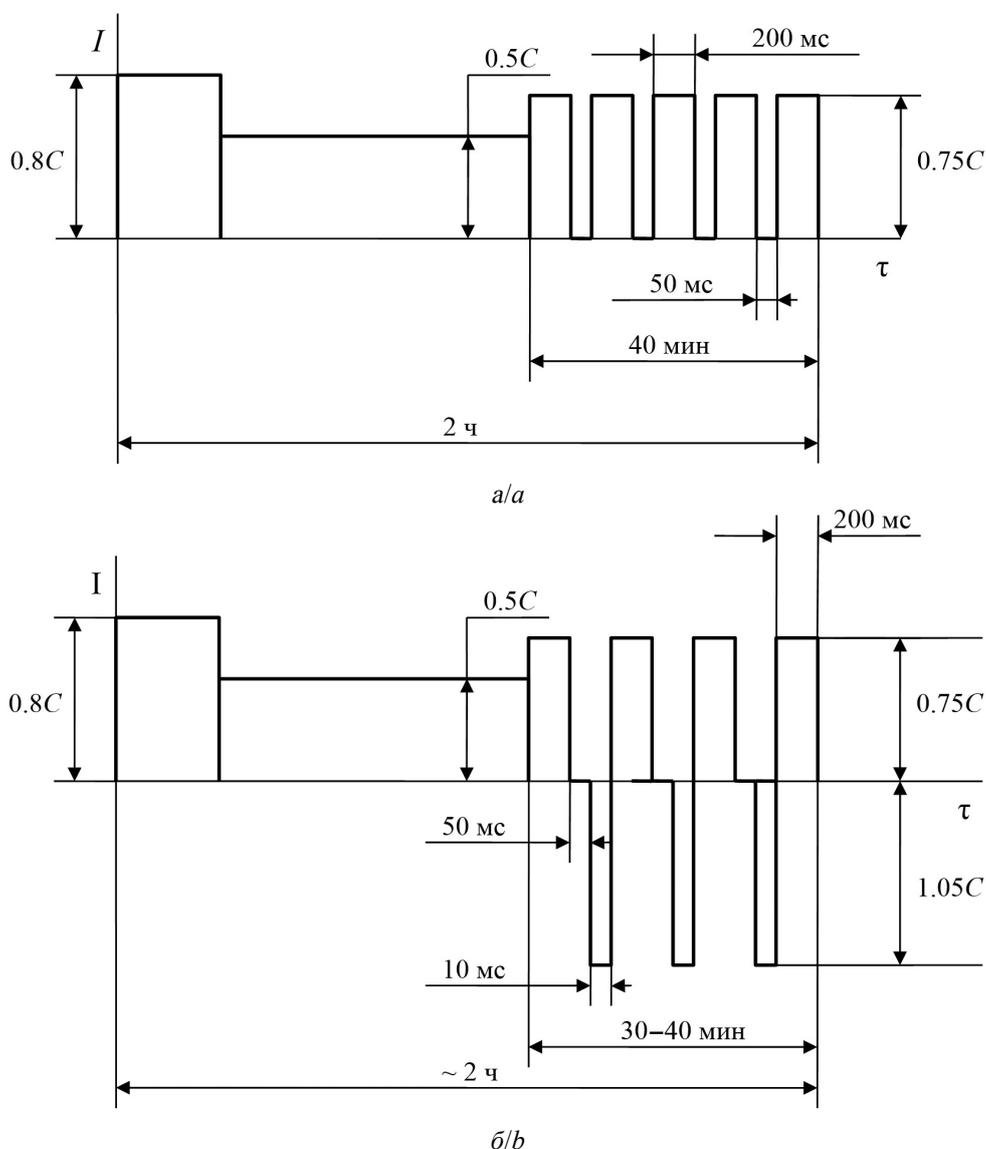


Рис. 4. Схема ускоренного заряда с симметричным (а) и асимметричным (б) импульсным током  
 Fig. 4. The scheme of the accelerated charge with symmetrical (a) and asymmetric (b) pulse current

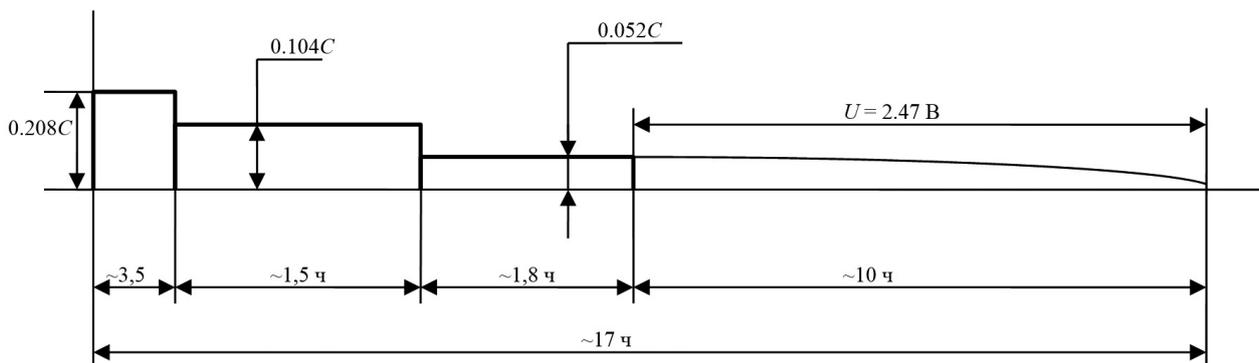


Рис. 5. Схема серийного режима заряда  
 Fig. 5. The scheme of the serial charge mode

циклирования с использованием серийного режима заряда, симметричного импульсного режима заряда или асимметричного импульсного режима заряда. Разряд проводили током  $0.1C_{НОМ}$  до конечного напряжения 1.80 В. На всех режимах при достижении аккумуляторами разрядной емкости менее 90% от номинальной проводили лечебный цикл, включающий последовательное проведение полного заряда, глубокого разряда и снова полного заряда.

На рис. 6 показано изменение разрядной емкости аккумуляторов в процессе их непрерывного циклирования с использованием ускоренного режима заряда с симметричным импульсным током на втором этапе и с применением штатного режима.

На рисунке видно, что при использовании штатного режима заряда разрядная емкость сохраняла относительно стабильное значение на протяжении 40-му циклов. Но уже к 42-му циклу емкость снизилась со 110 до 88%  $C_{НОМ}$ . Из того же рисунка следует, что применение рекомендованного ускоренного режима заряда приводит к некоторому снижению разрядной емкости. Так, за первые 14 проведенных циклов разрядная емкость снизилась с 107–110 до 92%  $C_{НОМ}$ . После проведения лечебного цикла (15-й заряд) емкость макета возросла до 109%  $C_{НОМ}$ . При дальнейшем циклировании в интервале 15-го – 32-го цикла разряд-

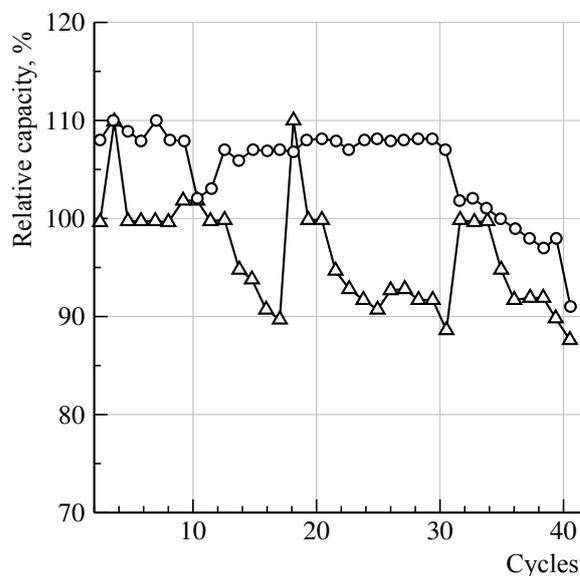


Рис. 6. Изменение разрядной емкости аккумуляторов, заряжаемых ускоренным ( $\Delta$ ) и штатным ( $\circ$ ) режимами, в процессе их непрерывного циклирования  
 Fig. 6. The change in the discharge capacity of batteries being charged with accelerated ( $\Delta$ ) and standard ( $\circ$ ) modes in the process of their continuous cycling

ная емкость снова снизилась со 109 до 90%  $C_{НОМ}$ .

На основании результатов испытания можно отметить, что применение ускоренного заряда с использованием симметричного импульсного тока при многократном уменьшении длительности заряда несколько снижает разрядную емкость при непрерывном циклировании. Однако, учитывая то, что проведение лечебного цикла практически восстанавливает разрядные характери-

стики аккумулятора, можно рекомендовать ограничить число подряд проводимых ускоренных зарядов на уровне 15 при допустимом снижении емкости до 90 % .

Методом непрерывного циклирования с использованием импульсного заряда с асимметричным током были испытаны аккумуляторы с номинальной емкостью 7 А·ч.

На рис. 7 показано изменение относительной разрядной емкости в процессе циклирования аккумуляторов при использовании ускоренного режима заряда с асимметричными импульсами на втором этапе. Видно, что в процессе циклирования ускоренным режимом аккумуляторы постепенно снижают разрядную емкость и достигают критического значения ( $0.8C_{\text{НОМ}}$ ) к 25-му циклу. После проведения лечебного цикла (26-го) емкость возросла до 103%. К 47-му циклу разрядная емкость снова снизилась ниже 80%. После проведения лечебного цикла (49-го) разрядная емкость вос-

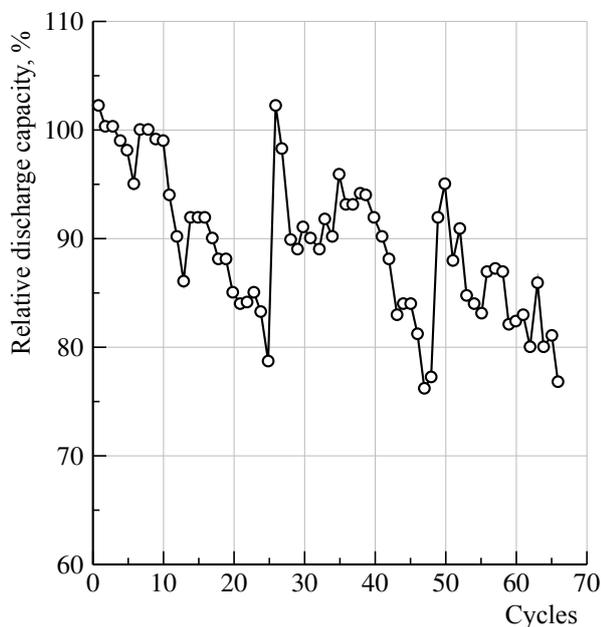


Рис. 7. Изменение относительной разрядной емкости в процессе циклирования аккумуляторов при использовании ускоренного режима заряда с асимметричными импульсами на втором этапе заряда

Fig. 7. The change in the relative discharge capacity in the process of cycling batteries using the accelerated charging mode with asymmetric pulses in the second stage of charging

становилась до 92%. И наконец, на 66-м цикле емкость составляла 77%. Таким образом, видно, что проведение лечебного цикла проводилось через 25, 23 и 19 циклов, использующих ускоренный заряд с асимметричным током. Это позволяет принять допустимое число подряд проводимых циклов на уровне 15–20. Ресурсы аккумуляторов при использовании ускоренного и штатного режимов заряда имели практически одинаковые значения на уровне 80–85 циклов. Невысокое значения ресурса связано с особенностями конструкции испытываемых аккумуляторов, главные из которых – свободная сборка электродов и небольшое перекрытие электродов сепаратором. В таких условиях имеет место развитие процесса оплывания положительных активных масс.

#### Газовыделение при ускоренном заряде

При измерении изменения напряжения в зарядном импульсе для испытываемых аккумуляторов было показано, что напряжение быстро достигает практически постоянного значения на уровне 3.1–3.2 В. Это указывает на то, что значительная часть импульсного заряда идет на газовыделение. В этой связи интерес представляет проведение сравнительной оценки газовыделения в процессе ускоренного и штатного режимов заряда. С этой целью были проведены бародинамические испытания макетов, позволяющих измерять внутреннее давление в аккумуляторах в процессе заряда.

На рис. 8 представлена зависимость внутреннего давления в аккумуляторах в процессе заряда ускоренным и штатным режимами от степени заряженности аккумулятора. При использовании серийного режима заряда давление слабо растет практически до 80–90%-ной степени заряженности, что указывает на высокую эффективность заряда свинцовых аккумуляторов до 80%-ной степени заряженности и резкое его снижение при степени заряженности выше 80%. Снижение степени заряженности приводит к резкому возрастанию газовыделения из аккумулятора.

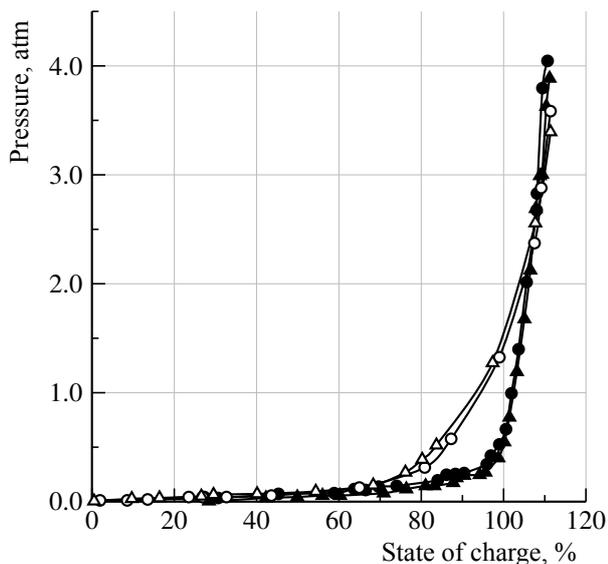


Рис. 8. Зависимость изменения внутреннего давления от степени заряженности аккумулятора. Серийный заряд – номер 4 (●), 5 (▲). Ускоренный заряд – номер 11 (△), 12 (○)

Fig. 8. The dependence of the change of the internal pressure on the charge state of the battery. Serial charge number 4 (●), 5 (▲). Accelerated charge number 11 (△), 12 (○)

Зависимость внутреннего давления от степени заряженности свинцового аккумулятора при использовании ускоренного режима количественно отличается от аналогичной зависимости, полученной при использовании серийного режима заряда. Заметное газовыделение отмечается при степени заряженности свыше 60%. В дальнейшем давление в макетах при использовании ускоренного режима заряда несколько превосходит давление в макетах, использующих серийный заряд. Однако в конце заряда ускоренным и серийным режимами при коэффициенте перезаряда 1.10–1.15 давление в макетах выравнивается.

Наблюдаемая закономерность связана с тем, что при использовании ускоренного режима заряда токи на гальваностатических и импульсной ступенях значительно выше токов, применяемых при заряде серийным режимом, что вызывает рост поляризации электродов и увеличение доли зарядного тока, идущего на газовыделение. Выравнивание давлений в конце заряда является несколько неожиданным фактом, ко-

торый может быть связан с использованием больших токов. По данным работы [6], высокие токи приводят к увеличению поверхности диоксида свинца за счет роста поляризации и, соответственно, увеличению вероятности возникновения зародышей диоксида свинца в процессе кристаллизации. Рост поверхности диоксида свинца, в свою очередь, снижает плотность зарядного тока и скорость газовыделения. Образованию мелкокристаллической структуры диоксида свинца способствуют также паузы между зарядными импульсами.

На рис. 9 показано изменение давления в макетах во времени при использовании серийного и ускоренного режимов заряда.

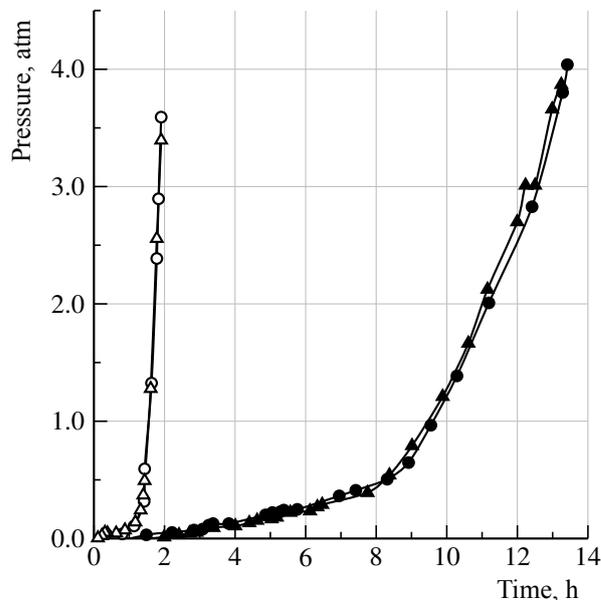


Рис. 9. Зависимость изменения внутреннего давления в макете от длительности заряда. Серийный заряд – номер 4 (●), 5 (▲). Ускоренный заряд – номер 11 (△), 12 (○)

Fig. 9. The dependence of the change of the internal pressure in the model on the charge duration. Serial charge number 4 (●), 5 (▲). Accelerated charge number 11 (△), 12 (○)

Из рисунка видно, что ускоренный режим заряда имеет длительность в 6 раз меньшую, чем серийный 4-ступенчатый гальваностатический заряд. При этом объем выделившихся газов при ускоренном режиме заряда практически такой же, как при серийном режиме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обобщая результаты настоящей и предыдущих работ, можно сделать следующие выводы.

1. Предложен ускоренный режим заряда, включающий два этапа:

- гальваностатический заряд токами  $0.8C_{НОМ}$  и  $0.5C_{НОМ}$ ,
- импульсный заряд.

2. Рассмотрены два варианта импульсного заряда – симметричным и асимметричным токами – и определены их основные параметры. При использовании симметричного тока амплитуда зарядного импульса 10 мс.

3. Общая длительность заряда составляет примерно 2 ч.

4. Испытания макетов аккумуляторов с применением ускоренного режима заряда с импульсным симметричным током показали, что проведение 15 подряд ускоренных зарядов сохраняет емкость на уровне допустимых значений (выше  $0.8C_{НОМ}$ ). Проведение

лечебного цикла после серии ускоренных зарядов практически восстанавливает разрядную емкость макетов аккумулятора.

5. Испытание макетов аккумуляторов с применением ускоренного режима заряда с импульсным асимметричным током показало, что в первой половине срока эксплуатации, после проведения подряд 25–30 ускоренных зарядов емкость макетов оставалась на уровне допустимых значений (выше  $80\%C_{НОМ}$ ). Проведение лечебного цикла после серии ускоренных зарядов повышает разрядную емкость макетов. Во второй половине срока эксплуатации, по мере увеличения наработки макетов, допустимое количество подряд проведенных ускоренных зарядов находится в диапазоне 10–15 циклов.

6. Проведенное бародинамическое исследование показало, что использование ускоренного режима заряда приводит к росту скорости газовыделения. Однако суммарное количество выделившегося газа после проведения ускоренного и серийного зарядов практически одинаково.

## БЛАГОДАРНОСТИ

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.*

## ACKNOWLEDGEMENTS

*This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rand D.* Valve-Regulated Lead-Acid Batteries / eds. P. T. Moseley, J. Garche. Amsterdam; Boston; London: Elsevier, 2004. 602 p.

2. *Каменев Ю. Б., Лушина М. В., Васина И. А.* Работа свинцово-кислотного аккумулятора в условиях постоянного недозаряда // *Электрохимическая энергетика*. 2008. Т. 8, № 3. С. 146–151.

3. *Ikeya T., Savada N., Takagi S.* Charging operation with high energy efficiency for electric vehicle valve-regulated lead-acid battery system // *J. Power Sources*. 2009. Vol. 91. P. 130–136.

4. *Каменев Ю. Б., Штомпель Г. А., Чуңц Н. И.* Ускоренный метод заряда свинцово-кислотного аккумулятора. 1. Гальваностатический этап заряда // *Электрохимическая энергетика*. 2012. Т. 12, № 2. С. 64–71.

5. *Каменев Ю. Б., Штомпель Г. А., Чуңц Н. И.* Ускоренный метод заряда свинцово-кислотного аккумулятора. 3. Импульсный заряд // *Электрохимическая энергетика*. 2013. Т. 13, № 2. С. 77–82.

6. *Lam L. T., Orgum H., Lim O.* Pulsed-current charging of lead-acid batteries – a possible means for overcoming premature capacity loss? // *J. Power Sources*. 1995. Vol. 53. P. 215–228.

7. *Kim S., Hong W.* Fast charging of lead-acid cell: effect of rest-period and depolarization pulse // *J. Power Sources*. 2000. Vol. 89. P. 93–101.

8. *Pavlov D., Petkova G., Dimitrov M.* Influence of fast charge on the life cycle of positive lead-acid battery plates // *J. Power Sources*. 2000. Vol. 87. P. 39–56.

9. *Pavlov D., Petkova G.* Influence of charge mode on the capacity cycle life of lead-acid battery negative plates // *J. Power Sources*. 2003. Vol. 113. P. 355–362.

10. *Каменев Ю. Б., Штомпель Г. А.* Ускоренный метод заряда свинцово-кислотного аккумулятора. 2. Гальваностатический заряд // *Электрохимическая энергетика*. 2013. Т. 13, № 2. С. 70–76.

11. *Вырапаев В. Н., Дасоян М. А., Никольский В. А.* Химические источники тока. М.: Высшая шк., 1990. 240 с.

REFERENCES

1. Rand D. Valve-Regulated Lead-Acid Batteries. Eds. P. T. Moseley, J. Garche. Amsterdam; Boston; London: Elsevier, 2004. 602 p.
2. Kamenev Y. B., Lushina M. V., Vasina I. A. Lead-acid batteries for partial-state-of-charge applications. *Electrochemical Energetics*, 2008, vol. 8, no. 3, pp. 146–151 (in Russian).
3. Ikeya T., Savada N., Takagi S. Charging operation with high energy efficiency for electric vehicle valveregulated leadacid battery system. *J. Power Sources*, 2009, vol. 91, pp. 130–136.
4. Kamenev Y. B., Shtompel' G. A., Chunts N. I. Accelerated charge method of the lead-acid batteries. 1. Constant current stage of the charge. *Electrochemical Energetics*, 2012, vol. 12, no. 2, pp. 64–71 (in Russian).
5. Kamenev Y. B., Shtompel' G. A., Chunts N. I. Accelerated charge method of the lead-acid batteries. 3. Pulse charge. *Electrochemical Energetics*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 77–82 (in Russian).
6. Lam L. T., Orgum H., Lim O. Pulsedcurrent charging of leadacid batteries – a possible means for overcoming premature capacity loss? *J. Power Sources*, 1995, vol. 53, pp. 215–228.
7. Kim S., Hong W. Fast charging of leadacid cell: effect of restperiod and depolarization pulse. *J. Power Sources*, 2000, vol. 89, pp. 93–101.
8. Pavlov D., Petkova G., Dimitrov M. Influence of fast charge on the life cycle of positive leadacid battery plates. *J. Power Sources*, 2000, vol. 87, pp. 39–56.
9. Pavlov D., Petkova G. Influence of charge mode on the capacity cycle life of leadacid battery negative plates. *J. Power Sources*, 2003, vol. 113, pp. 355–362.
10. Kamenev Y. B., Shtompel' G. A. Accelerated charge method of the lead-acid batteries. 2. Constant current charge. *Electrochemical Energetics*, 2013, vol. 13, no. 2, pp. 70–76 (in Russian).
11. Varypaev V. N., Dasoyan M. A., Nikol'sky V. A. *Khimicheskiye istochniki toka* [Chemical current sources]. Moscow, Vusshaya Shkola Publ., 1990. 240 p. (in Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Каменев Юрий Борисович** – доктор технических наук, профессор, начальник лаборатории научных и патентных исследований, ЗАО «Электротяга». Служебный тел.: +7 (812) 786-77-67, e-mail: batteryprofi@bk.ru

**Чунц Наталия Ивановна** – кандидат технических наук, ведущий инженер-технолог лаборатории научных и патентных исследований, ЗАО «Электротяга». Служебный тел.: +7 (812) 786-77-67, e-mail: batteryprofi@bk.ru

**Библиографическое описание статьи**

Каменев Ю. Б., Чунц Н. И. Ускоренный метод заряда свинцово-кислотного аккумулятора. 4. Импульсный заряд асимметричным током, газовыделение и ресурс // *Электрохимическая энергетика*. 2020. Т. 20, № 3. С. 146–156. DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2020-20-3-146-156>

**For citation**

Kamenev Yu. B., Chunts N. I. Accelerated Model of Charging of Lead-Acid Batteries. 4. Pulse Charge with Asymmetrical Current, Gas Evolving and Service Life. *Electrochemical Energetics*, 2020, vol. 20, no. 3, pp. 146–156 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1608-4039-2020-20-3-146-156>