

УДК 621.355.7.001.5

Привалов В.Н., канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр.,
Усатенко В.В., магистр
(ИГТМ НАН Украины),
Дзякович Д.А., магистр
(ООО «ДОЗ «Энергоавтоматика»)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БАТАРЕЙНЫХ ЗАРЯДНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Привалов В.М., канд. физ.-мат. наук, ст. науч. співр.,
Усатенко В.В., магістр
(ІГТМ НАН України),
Дзякович Д.О., магістр
(ТОВ «ДДЗ» Енергоавтоматика »)

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БАТАРЕЙНИХ ЗАРЯДНИХ КОМПЛЕКСІВ

Privalov V.N., Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Researcher,
Usatenko V.V., M.S. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine),
Dziakovich D.A., M.S. (Tech.)
(LLC "DOZ "Energoavtomatika")

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCHES OF BATTERY CHARGING SYSTEMS

Аннотация. Исследуется возможность создания высокоэффективных и безопасных энергетических комплексов, состоящих из аккумуляторной батареи и зарядного устройства к ней, предназначенных для эксплуатации на шахтных аккумуляторных электровозах.

Цель работы – разработать физические модели и определить рациональные параметры батарейных зарядных комплексов, а также провести их экспериментальные исследования.

Выполнен анализ известных в мире и в Украине технических решений в области химических источников тока и способов их заряда. Выделены приоритетные направления исследований: разработка научных основ создания батарейных зарядных комплексов на основе свинцово-кислотных аккумуляторных батарей тягового типа; повышение устойчивости свинцовых аккумуляторов и минимизация газовой выделенности в них; повышение энергетической эффективности и безопасности зарядных процессов в условиях угольной шахты. Проведен анализ существующего технического уровня средств и способов создания энергосберегающих зарядных комплексов. В качестве приоритетных выделены следующие способы: применение намазных электродных пластин с двойной сепарацией в совокупности с компрессией электродного блока, обеспечение рекомбинации газа внутри аккумулятора по кислородному циклу. Разработаны принципы моделирования и алгоритмы расчёта основных параметров батарейных зарядных комплексов. Определены наиболее оптимальные параметры и условия зарядного режима, обеспечивающие энергоэффективность и пожаровзрывобезопасность.

Для реализации зарядного режима предложено надёжное, безопасное и энергосберегающее зарядное устройство, эффективность которого обеспечивается следующими особен-

ностями: минимизация узлов силовой электроники; применение ограничительно - регулирующего резистора; естественное воздушное охлаждение.

Ключевые слова: тяговая аккумуляторная батарея, зарядное устройство, батарейный зарядный комплекс, шахтный электровоз, энергосберегающие технологии.

Введение. Новая разработка представляет собой попытку создать типоразмерный ряд устройств зарядных (УЗ) во взрывобезопасном исполнении (РП) типа УЗ-РП, предназначенных для заряда в автоматическом режиме кислотных батарей и их эксплуатации на электровозах, которые могут работать в зарядных камерах (гаражах) с обособленным проветриванием на поверхности и в шахтах, опасных по угольной пыли, по газу (метану) и/или его внезапным выбросам.

Проведенный анализ способов и состояния оценки технического уровня средств создания энергосберегающих зарядных комплексов показывает, что надёжность и длительность работы современных кислотных батарей БКТ зависят от оптимально подобранных режимов заряда, для чего требуется индивидуальный подбор УЗ к конкретному типоразмеру батареи. Правильно выбранное зарядное устройство улучшает эксплуатационные характеристики батареи, особенно в случае использования в перспективе новых конструкций батарей с иммобилизованным электролитом и рекомбинацией по кислородному циклу, то есть со значительным уменьшением уровня газовой выделенности при их систематических зарядах. Поэтому зарядные устройства должны представлять собой надёжное и сравнительно простое инженерное устройство с оптимальным ведением заряда вместо сложного инженерного сооружения с использованием микропроцессорной системы управления неоправданного обеспечения стабильности тока с помощью сложной промышленной электроники, объективно снижая эксплуатационную надёжность. Существующие зарядные устройства в случае выхода их из строя, как правило, требуют сложного и дорогостоящего ремонта.

В настоящее время программа модернизации шахтных электровозов предусматривает перевод электровозов на питание от кислотных тяговых батарей взамен щелочных батарей и зарядными устройствами ЗУК, ТПЕ или РЗУ РП. Речь идёт о применении кислотных батарей таких, как 52 БКТ-490-У5, 60 БКТ-490-У5, 56 БКТ-560-У5, 60 БКТ-560-У5, 72 БКТ-560-У5, 60 БКТ-640-У5, 72 БКТ-640-У5 и т. п. Указанные батареи эксплуатируются соответственно на электровозах АМ8Д, 2АМ8Д, АМ8ДГ, АВ8Г, АП85.

В основу новой разработки положены предыдущие научные разработки в виде патентов и публикаций в научных профильных журналах, связанные с проблемами газообразования в свинцово-кислотных аккумуляторах [1, 2]. Появилась возможность создания малообслуживаемого свинцово-кислотного аккумулятора с низким уровнем газовой выделенности при его работе [3, 4].

Целью работы является научное обоснование создания высокоэффективных, работающих в оптимальном режиме, и безопасных комплексов «Аккумуляторная батарея – Зарядное устройство», что является важнейшей задачей в области энергетики.

Основные задачи, возникающие в связи с поставленной целью, следующие:

- анализ способов и состояния оценки технического уровня средств создания

энергосберегающих зарядных комплексов;

- разработка физических моделей и алгоритмов расчёта основных параметров батарейных зарядных комплексов;
- определение рациональных параметров этих комплексов;
- проведение экспериментальных исследований.

Основная часть. Как известно [5], тяговые свинцово-кислотные (Pb/PbO_2) батареи по энергетическими характеристиками имеют преимущество по сравнению с щелочными (в промышленности - это никель-железные, кадмий-железные). Например, батарея свинцово-кислотная шахтная 72БКТ-640 для электровоза (144 В, 640 Ач при разряде током 5-часового тягового режима 128 А) развивает мощность 18 кВт и отдает энергию 92 кВт·ч. При такой же мощности (18 кВт) щелочная батарея никель-кадмиевая ($Cd/NiOOH$) способна отдать энергию на 25 % меньше, а именно - 69 кВт, и при большем разрядном токе. Таким образом, при 5 кВт/м³ кислотная батарея (Pb/PbO_2) производит 120 кВт/м³ против 90 кВт·ч /м³ в щелочном эквиваленте ($Cd/NiOOH$). По удельным характеристикам в расчете на единицу массы (Вт/кг против Вт·ч/кг) кислотная батарея Pb/PbO_2 имеет преимущество над щелочной $Cd/NiOOH$ с токами разряда (0,05-0,07) C_n А (C_n - номинальная емкость).

Согласно предоставленной аргументации видно, что щелочные тяговые аккумуляторы уступают кислотным по резервной энергии на единицу объема.

Важным фактором является стоимость батареи. Известно, что срок службы щелочных аккумуляторов более чем в 2 раза превышает срок службы свинцово-кислотных аккумуляторов. Между тем, если учитывать, что стоимость щелочных тяговых аккумуляторов в 3-4 раза превышает стоимость тяговых свинцовых аккумуляторов, то преимущество будет на стороне свинцовых аккумуляторов, потому что вместо одной щелочной батареи можно приобрести 3-4 свинцовых (вместо 4 000 циклов получится намного больше – от 5 600 до 8 000 циклов).

Образование взрывоопасных газов при заряде свинцовых аккумуляторов может быть существенно подавлено за счёт рекомбинации [6]. Идею рекомбинации выразил и запатентовал известный американский изобретатель, предприниматель и промышленник Эдисон. Но эта идея не могла быть реализована из-за отсутствия соответствующих материалов, сплавов и соответствующих технологий. Благодаря техническому прогрессу герметичный электрохимический источник энергии (аккумулятор рекомбинационного типа) может быть разработан, построен и применен на промышленном серийном уровне. Главным элементом батарейного зарядного комплекса для шахтных электровозов является тяговая аккумуляторная батарея, которая дополняется в составе комплекса зарядным устройством. Выбор рациональных режимов работы последнего диктуется свойствами батареи, выполненной предпочтительно на основе свинцового аккумулятора.

Для создания высокоэффективных и безопасных зарядных комплексов должны быть решены две научно-технические задачи:

- разработка механически более стойкой энергосберегающей тяговой свинцово-кислотной батареи специального назначения (относительно надежного функционирования в условиях сверхглубокой шахты) с практически отсут-

вующим саморазрядом;

- разработка опытного образца мощного зарядного устройства, которое функционирует в оптимальном автоматическом режиме, для шахтных аккумуляторных электровозов.

Анализируя способы создания современных комплексов в составе «Зарядное устройство – тяговая Батарея» следует отметить, что батарея в этом комплексе, как правило, помещается в корпус, который представляет собой стальной ящик с покрытием, обеспечивающим электрическую прочность и защиту от коррозии. Сейчас практически везде применяют в батарее электробезопасные гибкие кабельные переключки между аккумуляторными под болт, что очень удобно, надёжно и ремонтпригодно при замене отдельных аккумуляторов, вышедших из строя. Размеры батареи и её номинальное напряжение соответствует 2-вольтовому свинцово-кислотному аккумулятору для батарей БКТ или щелочному аккумулятору (1,3 В) для батарей типа ТНЖ.

Что касается зарядных устройств, то в настоящее время промышленностью выпускаются устройства с автоматизированным режимом заряда. В качестве тяговых аккумуляторов применяются как намазные, так и трубчатые. В трубчатых аккумуляторах используются положительные электроды трубчатой конструкции и решётчатые отрицательные электроды намазного типа. А в намазных аккумуляторах оба типа электродов – намазные. Циклическая наработка трубчатых аккумуляторов довольно большая и составляет 1000-1500 циклов. Однако данные аккумуляторы имеют более низкие пусковые (стартерные) электрические характеристики.

Для повышения энергоэффективности батарейных зарядных комплексов целесообразно использовать аккумуляторы с намазными электродами соответствующей толщины. Такие аккумуляторы, изготовленные с двойной сепарацией (мипласт и стекловолокно) и упругой сжатостью электродов будут более устойчивыми при циклической работе. Аккумуляторы с намазными электродами имеют меньшее внутреннее сопротивление и более высокий коэффициент использования активной массы, что обеспечивает лучшие характеристики при толковых и импульсных нагрузках и при коротких режимах разряда, а также повышает удельную энергию и мощность батареи.

Как показывает анализ имеющихся данных, применение традиционных устройств для заряда шахтных батарей нуждается в повышении КПД зарядного процесса; кроме того не выполнена до конца оптимизация основных параметров тягового свинцово-кислотного аккумулятора. Актуальными остаются вопросы экономии материалов при изготовлении батарей, потребляемой электроэнергии, снижения себестоимости процесса транспортирования грузов в шахтах. Повышение КПД зарядных процессов может быть достигнуто за счет оптимизации зарядного режима, а увеличение полезной энергии – за счет увеличения энергетической плотности (Вт·ч/кг) и допустимой плотности тока через электрод [7, 8].

Основной задачей, возникающей при конструировании аккумуляторов, является определение параметров конструкции аккумулятора, при которых он будет обладать требуемыми электротехническими характеристиками. Занижен-

ные электротехнические характеристики аккумуляторов могут не удовлетворить потребителя, а завышенные – предполагают перерасход сырья, комплектующих и энергии. Поэтому при конструировании аккумуляторов необходимо как можно более точный расчёт параметров их конструкции.

Тем не менее, в настоящее время не существует строгой методики расчёта параметров свинцового аккумулятора. Это объясняется большим количеством факторов, влияющих на расчётные величины, и недостаточной изученностью их роли в работе аккумулятора. Но главная трудность связана с тем, что процессы, протекающие в аккумуляторе, слишком сложны для точного количественного анализа. Обычно при расчёте свинцовых аккумуляторов различного назначения приходится исходить из опытных данных, полученных в тех или иных частных условиях. Главной целью расчёта является определение наиболее оптимальных параметров конструкции аккумулятора с заданными электротехническими характеристиками.

В результате проведенных исследований разработана конкретная методика, позволяющая рассчитать все основные параметры конструкции свинцового аккумулятора с заданными электротехническими характеристиками и конструктивными особенностями. При этом определяемые в соответствии с предлагаемой методикой параметры конструкции оптимизируются по расходу материалов на изготовление аккумулятора. В основе методики лежат общие представления о конструкции и основные принципы работы свинцово-кислотных аккумуляторов, а также описанная ниже концепция номинально-стартерной оптимизации и некоторые идеализированные допущения.

В качестве исходных данных в расчётах используются заданные электротехнические характеристики аккумулятора, свойства используемых материалов и некоторые конструктивные требования:

- номинальная ёмкость Q_H ;
- ЭДС ε ;
- стартерный ток I_C ;
- удельные ёмкости q_{\pm} и плотности ρ_{\pm} активных масс;
- плотность стартерного тока на поверхности пластин j_{cm} ;
- минимальная толщина электродов d_{\min}^{\pm} и толщина сепараторов d_c ;
- коэффициенты вместимости токоотводов χ_{\pm} ;
- доля намазной поверхности электродов γ ;
- параметры формы электродного блока ($d_{об}$, α , β);
- концентрация электролита в начале и в конце разряда g и g' .

В результате соответствующих вычислений удаётся точно определить основные параметры конструкции аккумулятора:

- количество активных масс m_{\pm} ;
- размеры и количество электродных пластин (d_{\pm} , w , h и n_{\pm});
- количество элементов батареи N ;
- объём электролита в заряженном и разряженном аккумуляторе $V_{эл}$ и $V'_{эл}$.

Номинально-стартерная оптимизация конструкции аккумулятора включает-

ся в минимизации расхода материалов на изготовление аккумуляторной батареи, обеспечивающей требуемые значения номинальной ёмкости и «стартерного» тока. Под стартерным током здесь и далее подразумевается ток пиковой нагрузки. Расчёт основных параметров конструкции в соответствии с предлагаемой концепцией номинально-стартерной оптимизации осуществляется в четыре этапа.

1. Определение основных параметров конструкции, обеспечивающих требуемую номинальную ёмкость, на основе ёмкостного баланса активных масс (номинальная оптимизация). Условие ёмкостного баланса

$$Q_H^+ = Q_H^- = Q_H.$$

2. Нарращивание совокупной площади активной поверхности электродных пластин для обеспечения требуемого стартерного тока (если требуется). Исходное условие

$$I_{cm} = I_C.$$

3. Сокращение избыточного количества активных масс, возникающего при наращивании совокупной электродной поверхности, и соответствующая минимизация толщины электродов. Условие минимизации

$$\Delta m_+ + \Delta m_- \rightarrow \min,$$

где Δm_{\pm} – избыток активных масс.

4. Определение количества электролита, соответствующего найденному количеству активных масс и предельным значениям концентрации. Используемая в расчётах ёмкость Q_H определяется как

$$Q_H = \min(Q_H^+, Q_H^-).$$

Существует три возможных варианта применения предлагаемой концепции номинально-стартерной оптимизации для расчёта основных параметров конструкции аккумулятора:

1. Стартерный ток аккумуляторной батареи после этапа номинальной оптимизации (1-й этап расчёта) превышает требуемое значение. В этом случае 2-й и 3-й этапы пропускаются. Особенности: номинальная ёмкость – требуемая, стартерный ток – больше требуемого, оптимизация конструкции – номинальная.

2. Требуемый стартерный ток обеспечивается на 2-м этапе расчёта. После сокращения избыточного количества активных масс (3-й этап) номинальная ёмкость аккумулятора снова принимает требуемое значение. Особенности: номинальная ёмкость – требуемая, стартерный ток – требуемый, оптимизация конструкции – смешанная.

3. Номинальная ёмкость аккумуляторной батареи после первых трёх этапов

расчёта превышает требуемое значение. В этом случае на 3-м этапе обеспечивается стартерная оптимизация. Особенности: номинальная ёмкость – больше требуемой, стартерный ток – требуемый, оптимизация конструкции – стартерная.

Данная методика была опробована на аккумуляторных батареях с просечно-вытяжными токоотводами. Точный расчёт в соответствии с разработанной методикой позволяет минимизировать расход материалов на изготовление аккумуляторной батареи, удовлетворяющей заданным электротехническим и конструктивным требованиям.

Для лабораторного исследования процесса заряда тяговых батарей шахтных электровозов были использованы специально разработанные однотипные зарядные устройства, которые отличаются между собой лишь мощностью силового 3-фазного трансформатора и выпрямительного блока. Например, трансформатор сухой 3-фазный ТС-14/0.66-УЗ мощностью 14 кВА на номинальное напряжение 50 Гц, 660-380 В по входу и 107 В по выходу. Схема соединения обмоток трансформатора – Ш/Δ. Охлаждение трансформатора – естественное, воздушное со степенью защиты IP00 по ГОСТ 14254.

При построении зарядного устройства использовалась наиболее подходящая 3-фазная мостовая схема, предложенная А.Н. Ларионовым (1923 г.) и нашедшая широкое применение. Предложен и реализован способ охлаждения УЗ не принудительный с помощью вентиляторов, а более безопасный и абсолютно надёжный – естественный, – путём теплопроводности металлических частей шкафа, теплового излучения внешней оболочки конструкции, а также конвекции окружающего воздуха. Разработана и апробирована электрическая принципиальная схема устройства для заряда батареи, а также схема соединений.

Проверка функционирования собранной системы для снятия и испытания электрических характеристик свинцово-кислотной батареи проводилась от 3-фазной сети при помощи выносного пульта управления ВПУ, содержащего магнитный пускатель и однофазный трансформатор 220 В / 36 В. Для контроля тока утечки использовался прибор РКУ-Зар.1М.

При испытаниях системы в качестве нагрузки (шахтная батарея) использовалась также эквивалентная батарея с ёмкостью $Q_{\text{экв}} = Q_5/k$. Реально на заряд ставится электровозная батарея с различной степенью заряженности.

Процессы заряда проводились как в ручном, так и в автоматическом режимах, с целью уточнения установочных данных. Исходя из потребностей практики, зарядный комплекс под названием «Зарядное устройство – Заряжаемая батарея» отработывался на время не более 10 ч и с таким расчётом, чтобы система работала удовлетворительно не только на выходные напряжение 150 В и максимальный ток 100 А для ёмкости 490 Ач, но и 170 В – 115 А, 210 В – 115 А, 170 В – 130 А, 210 В – 130 А для соответственно ёмкостей 560 Ач и 640 Ач. Работа велась на эквивалентах ёмкостной нагрузки.

Рациональные параметры рассчитывались для автоматического режима заряда. К рациональным параметрам относятся зарядный ток I_3 , зарядное напряжение U_3 и температура процесса T , которые должны обеспечиваться для полного заряда батареи с различной степенью разряженности, причём поддержание указан-

ных параметров происходит в автоматическом режиме.

Необходимые зарядные режимы гарантируются особенностями конструкции зарядного устройства и технологии изготовления герметизированного клапанно-регулируемого аккумулятора типа AGM-VRLA с иммобилизованным электролитом и рекомбинацией газа по кислородному циклу.

Зарядные комплексы и батареи к ним предназначены для работы в тяжёлых условиях, в атмосфере повышенной влажности, загазованности, высоких температур, постоянных зарядов-разрядов (как минимум ежедневных). Поэтому были исследованы дополнительные к вышеуказанным требования к конструкции и материалам, найдены реальные пути их реализации.

В результате реализации дополнительных требований батареи и зарядные устройства к ним были по исполнению РП - устройствами. Это даёт основание разрабатываемые устройства типа УЗ-РП классифицировать согласно НД как РП «е» (п) ИЦ Азо – рудничное взрывозащищённое электрооборудование повышенной надёжности против взрыва (РП) с защитой вида «е» (п) (по ГОСТ 22782.7-81) и искробезопасной электрической цепью (ИЦ), а также автоматическим защитным отключением (Азо – по ГОСТ 22782.5-78).

Такой уровень защиты обеспечивается за счёт:

- а) использования для контроля утечки тока прибора РКУ-Зар.1М;
- б) создания искробезопасной цепи;
- в) обеспечения по ГОСТ 14254 степени защиты IP54 шкафа от внешних воздействий;
- г) выполнения ограничительно - регулирующего резистора $R_{огр}$ из нихромового провода 20ХН80М (диаметром 6-8 мм) в виде развёрнутой крупногабаритной конструкции, размещённой в кварцевом песке (ГОСТ 22782.2-77) и прикреплённой снаружи к задней стенке шкафа;
- д) эффективного теплоотвода, который обеспечивается не принудительным охлаждением с помощью вентиляторов, а путём теплопроводности металлических частей шкафа, теплового излучения внешней оболочки конструкции шкафа и конвекции наружного воздуха;
- е) использования шайб, гаек, перемычек из латуни или бронзы.

Конструкция указанного выше ограничительно - регулирующего резистора с размерами 60x600x1200 мм позволяет обеспечить эффективный теплоотвод путём естественной теплопроводности (в том числе и металлических частей зарядного шкафа) и конвекции наружного воздуха, не прибегая при этом к услугам вентиляторов и не создавая дополнительную опасность искробразования, а наоборот, повышая в принципе надёжность устройств за счёт возможно большего отсутствия функционально-силовой электроники.

При правильно выбранном $R_{огр}$ достигаются условия, когда изменения тока I в процессе заряда ячейки таковы, что связанная с этими изменениями температура стабилизируется на определённом уровне и не превышает 57°C. Это является верным признаком того, что система не перегреется, и батарея зарядится в оптимально короткий срок с минимальными энергозатратами.

При проведении зарядного процесса последний характеризуется тремя эта-

пами, соотносящимися по длительности как 1:2:6. Очевидно, что длительность этапов определяется зарядным током, который в свою очередь зависит от ёмкости батареи. Например, для «мягкого» заряда, когда время не лимитируется, общее время до полного заряда составляет 48 ч.

Испытания и проверки начинались на полностью заряженных штатных батареях. При отсутствии штатных батарей испытания и проверки проводились с эквивалентами – батареями меньшей ёмкости $Q_{\text{экв}} < Q_5$, но также полностью заряженными. В этом случае между Устройством и эквивалентной батареей включался дополнительный резистор с сопротивлением, равным

$$R_{\text{дон}} = (k - 1)R_{\text{огр}};$$

где $k = Q_5/Q_{\text{экв}}$ – коэффициент пропорциональности. Мощность резистора $R_{\text{дон}}$ была не меньше резистора $R_{\text{огр}}$. Нагрузочный резистор $R_{\text{огр}}$ рассчитывался по экспериментально найденной формуле

$$R_{\text{огр}} = 11,52 \cdot n / Q_5 \text{ (Ом);}$$

где n – количество аккумуляторов в батарее. В процессе работы устройства и выполнения заряда данной батареи измерялись входные фазовые напряжения U_{ϕ} и токи I_{ϕ} и вычислялась потребляемая мощность P при включении первичной обмотки силового трансформатора звездой:

$$P = 3I_{\phi}U_{\phi} \cdot 10^{-3} \text{ (кВт).}$$

Полученные результаты по УЗ-РП-104/490 приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Технические параметры экспериментального зарядного устройства УЗ-РП-104/490

Тип (обозначение) устройства	Напряжение $U_{\text{хх}}$, В		Ток макс. $I_{\text{макс}}$, А		Габ. размеры LxVxH, мм	Потреб. мощность P , кВт, не более
	д.б.	факт	д.б.	факт		
УЗ-РП-104/490	150	147	100	95	950x800x1950	14

Проверялись напряжения и токи заряда U_3 и I_3 для батарей с различной степенью разряженности. Экспериментальное устройство типа УЗ-РП-104/490 было применено для испытания его на надёжность и температуру при прогоне, то есть в течение длительного периода (около 3 сут.) его непрерывной работы. Заряды велись как на штатную батарею в качестве нагрузки, так и на эквивалент омической нагрузки с целью выяснить предельные значения нагрузочных токов и температур. Проведенные измерения показали, что температура не превышала допустимых значений. На устройстве типа ЗУ-РП-104/490 также проверялось срабатывание защит.

Особенностью эксплуатации зарядного комплекса является то, что он рабо-

тает в циклическом режиме каждодневного заряда-разряда в тяжёлых подземных условиях, опасных по пыли и газу, что требует особенного внимания к режиму зарядного цикла как сточки зрения обеспечения пожаровзрывобезопасности, так и обеспечения долговечности и большого рабочего ресурса.

Новая электродная пластина для аккумулятора электровозной батареи принципиально отличается от имеющихся и традиционно используемых тем, что представляет собой последовательное соединение двух решёток через посредством промежуточного коллектора, получаемых литейным способом, что приводит к более равномерной токовой нагрузке на всю площадь решётки, обеспечивая тем самым её более эффективную и долговечную работу. Кроме того, в этом случае понижается омическое электрическое сопротивление.

Экспериментальные исследования показали, что впервые применённые двойная сепарация и сжатие блока намазных пластин в аккумуляторе при использовании в качестве сепаратора нового упруго-сжимаемого стекловолоконного материала (AGM) с высокой пористостью и адсорбцией электролита позволяют повысить устойчивость при циклировании, то есть увеличить надёжность и срок службы батареи.

Проведенное экспериментальное исследование предлагаемых батарейных зарядных комплексов подтверждает возможность и целесообразность внедрения свинцово-кислотных аккумуляторных батарей для шахтных электровозов в комбинации с соответствующими зарядными устройствами. Полученные результаты показали, что открывается перспектива перехода к более экономичным аккумуляторам с намазными пластинами типа «развёрнутая трубка» взамен дорогостоящих трубчатых (панцирных) электродов с запрессованной пастой. Впервые получены результаты по газовыделению в зависимости от режимов эксплуатации рекомбинационных батарей VRLA. Для указанных систем рассчитаны и апробированы скорости воздухообмена в рабочем помещении.

По результатам экспериментальных исследований циклических режимов выработаны рекомендации по обеспечению пожаровзрывобезопасности.

При построении макетных зарядных устройств достигнут уровень РП – повышенная устойчивость против взрыва с защитой вида «е» от внешних воздействий, с искробезопасной цепью и автоматическим отключением.

Следует отметить, что современный шахтный комплекс в виде комплекта «Зарядное устройство – Аккумуляторная батарея» в принципе создан, и потому уместна не «отдалённая перспектива», а реальное предложение на рынке, касающееся готовности обеспечить эксплуатацию с высоким уровнем безопасности (как того требует ГОСТ 12.11.2-86) батарей и зарядных устройств к ним, специально сконструированных для рудничных электровозов. Грамотное оптимальное сочетание «электровоз – высокотехнологичная батарея – зарядное устройство» - это прямой путь к удешевлению продукции и одновременно к обеспечению надёжности, долговечности и бесперебойной её эксплуатации.

Выводы. Основные результаты выполненной работы заключаются в следующем.

1. Исследованы электрические свойства химического источника тока (ХИТ)

с впервые созданной и изготовленной электродной пластиной, принципиально отличающейся от применяемых тем, что токоотвод новой пластины (электрода) представляет собой последовательно-параллельное соединение двух решёток посредством токового коллектора, что приводит к более равномерной токовой нагрузке электрода в целом, обеспечивая тем самым более эффективную и долговременную работу.

2. Предложены и опробованы новая конструкция и технология изготовления герметизированного клапанно-регулируемого аккумулятора типа AGM-VRLA с иммобилизованным электролитом и рекомбинацией газа по кислородному циклу. Впервые применена двойная сепарация и сжатие намазных пластин аккумулятора путём использования в качестве сепаратора упруго сжимаемого (в 1,5-2,5 раза) стекломата (AGM) с высокой пористостью и адсорбцией электролита (90-92 %). Обнаружено, что аккумуляторы подобного рода обладают повышенной устойчивостью при циклировании, т.е. более долговечны.

3. Впервые определены интенсивности газовыделения для различных режимов работы герметизированного аккумулятора рекомбинационного типа с клапанно-регулируемой системой (VRLA). Рассчитана скорость воздухообмена в рабочем помещении, необходимая для безопасного заряда указанных аккумуляторов.

4. Изучены особенности работы AGM-VRLA аккумуляторов в режиме каждодневного «заряда-разряда» и разработаны меры по обеспечению пожаровзрывобезопасности при эксплуатации свинцово-кислотных тяговых батарей в угольной шахте.

5. Впервые разработано, изготовлено во взрывобезопасном исполнении и исследовано экспериментальное устройство типа УЗ-РП-104/300-490 с использованием ключевой роли ограничительно - регулирующего резистора в качестве обязательного функционального элемента для заряда батарей шахтного электровоза.

6. Осуществлён автоматический в ускоренном варианте процесс полного заряда батареи шахтного электровоза в составе комплекса УЗ-РП-104/300-490 и 52БКТ-300 У5.

Эти результаты определяют технические и технологические условия для создания современного зарядного комплекса «Устройство зарядное – Аккумуляторная батарея» для шахтного электровоза. Проведенная работа повышает готовность обеспечить эксплуатацию в шахте техники по транспортированию минерального сырья. Грамотное оптимальное сочетание «Электровоз – Высокотехнологичная батарея – Зарядное устройство» это прямой путь к удешевлению продукции и обеспечению надёжной эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, О.О. Саморозряд ХДС за даними імпедансної спектроскопії / О.О. Кузнецов, В.Ю. Копіг, В.Я. Нетесса // Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спецвипуск. - 2000. - Т.2. - №1 - С.592-595.

2. Стан і перспективи розвитку свинцевих акумуляторів нового покоління в Україні / О. Зимін, В. Привалов, Є. Калиновський, В. Крись // Вісник Львівського університету. – 2000. – Вип.42. ч.1. – С. 131-134.

3. Исследование саморазряда свинцово-кислотных аккумуляторов / Е.А. Калиновский, О.П. Зимин, В.Н. Привалов, В.Я. Крись // Вопросы химии и химической технологии. – 2006. - №6 – С.163-

167.

4. Пат. № 79203 UA, МПК⁷: H01M 10/48. Спосіб визначення величини саморозряду свинцево-кислотної акумуляторної батареї / О.П. Зимін, В.М. Привалов, Д.О. Дзякович, Є.А. Калиновський. – № a200509736; Заявл. 17.10.2005; Опубл. 25.05.2007; Бюл. № 7/2007. – 3 с.

5. Багоцкий, В.С. Химические источники тока / В.С. Багоцкий, А.М. Скундин. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.

6. Исследование возможности создания малообслуживаемых герметизированных аккумуляторов / Е.А. Калиновский, О.П. Зимин, В.Я. Крысь, В.Н. Привалов // Вопросы химии и химической технологии. – 2006. – №5. – С. 174-178.

7. Сплавы для положительных токоотводов малоуходных свинцовых аккумуляторов / Ю.Б. Каменев, А.В. Киселёва, Е.И. Остапенко, Ю.В. Скачков // Электрохимэнергетика. - 2001. - Т.1 - №3 - С.17-20

8. Полищук, Ю.В. Модифицированные электродные материалы для кислотных аккумуляторов нового поколения / Ю.В. Полищук, Н.А. Колесникова, В.Я. Крысь // Вопросы химии и химической технологии. - 2004. - №1 - С.163-166.

REFERENCES

1. Kuznetsov, O.O., Kopig, V.Y. and Netesa, V.Y.(2000), “CDU self-discharge according impedance spectroscopy”, *Fiziko-khimichna mekhanika materialiv*, vol. 2, no. 1, pp. 592-595.

2. Zimin, O., Privalov, V., Kalinovskiy, Ye. and Krysa, V. (2000), “State and prospects of the new generation of lead batteries in Ukraine”, *Visnik Lvivskogo universitetu*, vol.42, no. 1, pp. 131-134.

3. Kalinovskiy, E.A., Zimin, O.P., Privalov, V.N. and Krysa, V.Y. (2006), “The study of self-discharge lead-acid batteries”, *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii*, no 6, pp. 163-167.

4. Zimin, O.P., Privalov, V.N., Dzyakovich, D.O. and Kalinovskiy, E.A. (2005), *Sposib vyznachennya velychyny samorozryadu svintsevo-kislotnoyi akumulyatornoyi batareyi* [Method of determining the value of self-discharge lead-acid battery], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat.№ 79203.

5. Bagotskiy, V.S. and Skundin, A.M. (1981), *Khimicheskie istochniki toka* [Chemical current sources], Energoizdat, Moscow, USSR.

6. Kalinovskiy, E.A., Zimin, O.P., Krysa, V.Y. and Privalov, V.N. (2006), “Study the possibility of creating low-maintenance sealed batterie”, *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii*, no 5, pp. 174-178.

7. Kamenev, Y.B., Kiseleva, A.V., Ostapenko, E.I. and Skachkov, Yu.V. (2001), “Alloys for positive electrodes of low-waste lead-acid batteries”, *Elektrokhimenergetika*, vol.1, no 3, pp. 17-20.

8. Polishchuk, Yu.V., Kolesnikov, N.A. and Krysa, V.Y. (2004), “The modified electrode materials for acid batteries of new generation”, *Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii*, no 1, pp. 163-166.

Об авторах

Привалов Владимир Николаевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник отдела Проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), г. Днепр, Украина, privalov-ista@ukr.net.

Усатенко Виктория Вячеславовна, магистр, ведущий инженер отдела Проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), г. Днепр, Украина, privalov-ista@ukr.net.

Дзякович Дмитрий Александрович, магистр, инженер отдела Стандартизации, сертификации и патентно-лицензионной работы, Общество с ограниченной ответственностью «Днепропетровский опытный завод «Энергоавтоматика» (ООО «ДЗОЗ «Энергоавтоматика»), г. Днепр, Украина, privalov-ista@ukr.net.

About the authors

Privalov Vladimir Nikolaevich, Candidate of Physics and Mathematics Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher of Department of Mine Energy Complexes, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, privalov-ista@ukr.net.

Usatenko Viktoriya Vyacheslavovna, Master of Sciences (M.S.), Principal Engineer of Department of Mine Energy Complexes, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, privalov-ista@ukr.net.

Dzyakovich Dmitriy Aleksandrovich, Master of Sciences (M.S.), Engineer of Department of Standardization, Certification and patent-license work, Limited Liability Company “Dnepropetrovskiy Opytnyy Zavod

“Energoavtomatika” (LLC “DOZ “Energoavtomatika”), Dnepr, Ukraine, privalov-ista@ukr.net.

Анотація. Досліджується можливість створення високоефективних і безпечних енергетичних комплексів, що складаються з акумуляторної батареї та зарядного пристрою до неї та призначених для експлуатації на шахтних акумуляторних електровозах. Мета роботи - розробити фізичні моделі і визначити раціональні параметри батарейних зарядних комплексів, а також провести їх експериментальні дослідження. Виконано аналіз відомих в світі і в Україні технічних рішень в області хімічних джерел струму та способів їх заряду. Виділено пріоритетні напрямки досліджень: розробка наукових основ створення батарейних зарядних комплексів на основі свинцево-кислотних акумуляторних батарей тягового типу; підвищення стійкості свинцевих акумуляторів та мінімізація газовиділення в них; підвищення енергетичної ефективності і безпеки зарядних процесів в умовах вугільної шахти. Проведено аналіз існуючого технічного рівня засобів і способів створення енергозберігаючих зарядних комплексів. В якості пріоритетних виділені наступні способи: застосування намазної електродної пластини з подвійною сепарацією в сукупності з компресією електродного блоку, забезпечення рекомбінації газу всередині акумулятора по кисневому циклу. Розроблено принципи моделювання і алгоритми розрахунку основних параметрів батарейних зарядних комплексів. Визначено найбільш оптимальні параметри і умови зарядного режиму, що забезпечують енергоефективність і пожежовибухобезпеку. Для реалізації зарядного режиму запропоновано надійний, безпечний і енергозберігаючий зарядний пристрій, ефективність якого забезпечується наступними особливостями: мінімізація вузлів силової електроніки; застосування обмежувально-регулюючого резистора; природне повітряне охолодження.

Ключові слова: тягова акумуляторна батарея, зарядний пристрій, батарейний зарядний комплекс, шахтний електровоз, енергозберігаючі технології.

Abstract. A possibility to create a highly efficient and safety power complexes consisting of a storage battery with charger for using in the mine storage-battery locomotives was studied. Objective of the study: to develop physical models, and to determine rational parameters for the battery charging systems, as well as to conduct experimental study with them. Different technical solutions on chemical current sources and methods of their charging known in the world and in Ukraine were analyzed. The following research priorities were established: to develop scientific bases for creating battery charging systems based on the lead-acid batteries of traction type; to improve lead-acid battery stability and to minimize gas emissions in them; and to improve energy efficiency and safety of charging process in the coal mines. Current technical level of equipment and methods for designing the energy-efficient charging systems were analyzed. The following methods were chosen as the priorities: usage of smeared electrode plates with double separation in combination with compression of electrode assembly, and gas recombination inside the battery by oxygen cycle. Principles and algorithms of modeling were developed for calculating basic parameters of the battery charging systems. The most optimal parameters and conditions for the discharge regime were determined, which would provide energy efficiency and fire and explosion safety. In order to realize this charging regime, a reliable, safety and energy-efficient charger is proposed, effectiveness of which is ensured by the following features: minimum components in the power electronics, restrictive-and-regulating resistor, and natural air cooling.

Keywords: tractive storage battery, battery charger, battery charging system, mine locomotive, energy-saving technology.

Статья поступила в редакцию 05.10.2016

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Семененко Е.В.