

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

*А. В. КИРИЛЛОВ, М. А. КОВАЛЁВ, В. И. СОЛОВЬЕВ*

## АВИАЦИОННЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 25.03.02 Техническая эксплуатация авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов

Самара  
Издательство Самарского университета  
2020

УДК 629.7(075)

ББК 68.53я7

К431

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Ф. В. Г р е ч н и к о в,  
д-р техн. наук, доц. А. Б. П р о к о ф ь е в

*Кириллов, Алексей Владимирович*

К431 **Авиационные аккумуляторные батареи:** учебное пособие /  
*А. В. Кириллов, М. А. Ковалёв, В. И. Соловьев.* – Самара:  
Издательство Самарского университета, 2020. – 80 с.: ил.

**ISBN 978-5-7883-1548-5**

Рассмотрено назначение, состав, особенности конструкции и  
технические характеристики аккумуляторных батарей.

Пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся  
по авиационно-техническим специальностям и направлениям  
подготовки.

Подготовлено на кафедре эксплуатация авиационной  
техники.

УДК 629.7(075)

ББК 68.53я7

ISBN 978-5-7883-1548-5

© Самарский университет, 2020

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА.....	6
1.1 Общие сведения.....	6
1.2 Классификация химических источников тока.....	7
1.3 Основные электрические характеристики химических источников тока.....	9
1.4 Применение аккумуляторных батарей в авиации .....	15
2 КИСЛОТНЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ .....	16
2.1 Применение в авиации.....	16
2.2 Принцип действия.....	19
2.3 Типовая конструкция .....	21
2.4 Электрические и эксплуатационные характеристики .....	24
3 ЩЕЛОЧНЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ.....	34
3.1 Аккумуляторная батарея 15СЦС-45Б.....	34
3.1.1 Применение в авиации .....	34
3.1.2 Принцип действия .....	35
3.1.3 Устройство и конструкция.....	38
3.1.4 Электрические характеристики .....	41
3.2 Аккумуляторная батарея 20НКБН-25(40).....	45
3.2.1 Применение в авиации .....	45
3.2.2 Принцип действия .....	45
3.2.3 Устройство и конструкция.....	46
3.2.4 Электрические характеристики .....	48
3.3 Аккумуляторная батарея 20КСХ 22 Р .....	53
3.3.1 Применение в авиации .....	53
3.3.2 Принцип действия .....	53
3.3.3 Устройство и конструкция.....	54
3.3.4 Технические характеристики.....	57
3.4 Никель-металлгидридные аккумуляторные батареи .....	60
3.4.1 Применение в авиации .....	60
3.4.2 Принцип действия .....	60
3.4.3 Электрические характеристики .....	61

4 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ .....	63
4.1 Литий-ионные аккумуляторы .....	66
4.1.1 Принцип действия .....	67
4.1.2 Конструкция .....	67
4.1.3 Электрические характеристики .....	69
4.1.4 Особенности эксплуатации.....	70
4.2 Литий-полимерные аккумуляторы .....	71
4.3 Воздушно-цинковые аккумуляторы .....	74
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	75
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	76

## ВВЕДЕНИЕ

Первый прообраз аккумулятора, который, в отличие от батареи Алессандро Вольты, можно было многократно заряжать, был создан в 1803 году Иоганном Вильгельмом Риттером. Его аккумуляторная батарея представляла собой столб из пятидесяти медных кружочков, между которыми было проложено влажное сукно. При пропускании через данное устройство тока от вольтова столба оно само стало вести себя как источник электричества.

Трудно переоценить роль аккумуляторных батарей в жизнедеятельности человека. Пожалуй, ни одна отрасль промышленности, начиная от бытовой электроники и заканчивая космическими аппаратами, в современном мире не может обойтись без них. Аккумуляторные батареи (последовательное соединение нескольких аккумуляторов) применяются для автономного электропитания различных электротехнических устройств и оборудования. Создание высокоэффективного в энергетическом отношении источника энергии, способного длительное время выдавать большой разрядный ток, иметь большое значение ёмкости и срока службы при малых саморазряде и массогабаритных характеристиках – вот цель последних лет для разработчиков автономных источников питания.

Цель данного учебного пособия – познакомить читателя с основными типами аккумуляторных батарей, применяемых в авиации, рассмотреть их конструкцию, принцип действия, а также отметить достоинства и недостатки.

# 1 ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА

## 1.1 Общие сведения

Химическими источниками тока называются устройства, у которых энергия протекающих в них химических реакций непосредственно преобразуется в электрическую энергию.

Химические реакции в химических источниках тока являются окислительно-восстановительными. Теоретически любая окислительно-восстановительная реакция может быть положена в основу работы химического источника тока. Практически используются лишь некоторые реакции, выделяющие большее количество энергии.

Окислительно-восстановительная реакция заключается в том, что атомы или ионы одного из реагирующих веществ (восстановителя) переходят к другому реагирующему веществу (окислителю).

При непосредственном соприкосновении реагирующих веществ, как это имеет место при химических реакциях, обмен электронами сопровождается выделением тепловой энергии. В химических источниках тока окислительный и восстановительный процессы пространственно разделены при помощи проводников второго рода (проводников с ионной проводимостью). В этом случае переход электронов от одного реагирующего вещества к другому может быть осуществлён лишь при соединении этих веществ внешним проводником первого рода (с электронной проводимостью). Тогда в замкнутой цепи потечёт электрический ток и свободная энергия реагирующих веществ будет освобождаться в виде электрической энергии.

Проводниками второго рода в химических источниках тока являются электролиты.

Совокупность применяемых активных веществ и электролита называется электрохимической системой.

Структурная схема электрохимической системы имеет следующий вид:

**(+) активное вещество – электролит – активное вещество (-)**

Активные вещества, на которых возникает положительный или отрицательный потенциалы, вызываются электродами. Слева на схеме – положительный электрод, справа – отрицательный.

Назначением каждого химического источника тока являются отдача электрической энергии во внешнюю цепь. Процесс отдачи электрической энергии во внешнюю цепь называется разрядом. В процессе разряда химическая энергия превращается в электрическую, а активное вещество электродов превращается в продукты разряда.

При разряде на отрицательном электроде протекает реакция окисления, а на положительном электроде – реакция восстановления. Реакция окисления сопровождается отдачей электронов во внешнюю цепь, а реакция восстановления – приёмом электронов из внешней цепи.

## **1.2 Классификация химических источников тока**

Химические источники тока по особенностям работы можно разбить на три группы:

- гальванические элементы;
- аккумуляторы;
- топливные элементы.

*Гальваническими элементами* называются химические источники тока, действие которых основано на использовании необратимых электрохимических систем. Необратимыми

электрохимическими системами являются такие, у которых заряд по каким-либо причинам затруднён или невозможен. Для изготовления гальванических элементов применяется большее число электрохимических систем. Все они по типу конструкции могут быть разделены на две группы элементов: сухие и наливные.

Сухие элементы имеют непроливающийся электролит. Электролит этих элементов представляет собой клейстероподобную массу. Примерами сухих элементов являются:

- марганцово-никелевый;
- кислородно-цинковый;
- марганцово-кислородно-цинковый;
- марганцово-магниевый;
- ртутно-цинковый;
- окисло-ртутный.

Наливные элементы имеют специальный резервуар для электролита. В действие они приводятся путём заливания электролита в электрохимическую систему непосредственно перед применением. После наполнения электролитом их сохранность исчисляется несколькими часами, а иногда и минутами. Сохранность сухих элементов составляет несколько месяцев.

К наливным элементам относятся:

- свинцово-цинковый;
- свинцово-кадмиевый;
- свинцовый с хлорной кислотой;
- серебряно-цинковый с окисью серебра;
- серебряно-магниевый с хлористым серебром;
- медно-магниевый с хлористой медью и др.

*Аккумуляторами* называют химические источники тока, основанные на обратимых электрохимических системах и предназначенные для многократного использования их активных материалов, регенерируемых путём заряда. Накопление

(аккумуляция) электрической энергии происходит во время заряда аккумулятора.

В *топливных элементах* электрическая энергия получается, в отличие от гальванических элементов и аккумуляторов, не за счёт преобразования активного вещества электродов, а за счёт преобразования химической энергии топлива и окислителя, подводимых к электродам. Топливо и окислитель подводятся к электродам по мере расходования их в элементе. Материалы электродов и электролита непосредственно не расходуются, а являются лишь катализаторами. Одной из первых была разработана кислородно-водородная система топливного элемента -  $O_2/KOH/H_2$ .

Первыми источниками электрической энергии на летательных аппаратах были химические источники тока. В первую очередь применялись гальванические элементы, затем аккумуляторы и топливные элементы.

### **1.3 Основные электрические характеристики химических источников тока**

Основными характеристиками химических источников тока являются: электродвижущая сила, внутреннее сопротивление, напряжение, разрядная ёмкость, саморазряд, удельная энергия, коэффициенты отдачи по ёмкости и по энергии, срок службы и сохранность. Кратко рассмотрим эти характеристики.

*Электродвижущей силой* (ЭДС) химических источников называется разность между потенциалами его электродов при разомкнутой внешней цепи:

$$E = \varphi_+ - \varphi_- ,$$

где  $\varphi_+$  и  $\varphi_-$  – потенциалы положительного и отрицательного электродов.

Под потенциалом электрода подразумевают разность потенциалов, возникающую между электродом и электролитом на границе их соприкосновения. Величина потенциала электрода зависит от материала электродного вещества, температуры и концентрации электролита.

Если активным веществом электродов являются металлы (свинец, кадмий, цинк и др.), то в электролите они заряжаются отрицательно. Активные вещества электродов, обладающие окислительными свойствами (такие как  $\text{PbO}_2$ ;  $\text{AgO}$ ;  $\text{MnO}_2$ ;  $\text{Ni}(\text{OH})_3$ ), заряжаются положительно.

Скачок потенциала возникает на границе электрод-электролит. Это связано с появлением на этой границе двойного электрического слоя заряженных частиц. Одна группа частиц находится на электроде, а другая – ионная группа частиц с противоположным зарядом около него. В результате этого электроды, электрически нейтральные до помещения в электролит, становятся заряженными внутри электролита.

*Полное внутреннее сопротивление  $R$  химического источника тока (сопротивление постоянному току) состоит из омического сопротивления  $r$  и сопротивления поляризации  $r_n$ .*

$$R = r + r_n.$$

Омическое сопротивление  $r$  представляет собой сумму сопротивлений:

$$r = r_1 + r_2 + r_3 + r_4,$$

где  $r_1$  – сопротивление электродов;

$r_2$  – сопротивление электролита;

$r_3$  – переходное сопротивление электрод-электролит;

$r_4$  – сопротивление сепараторов.

Сопротивление поляризации  $r_n$  зависит от ЭДС поляризации  $E_n$  и тока  $I$ , протекающего через источник:

$$r_n = \frac{E_n}{I}.$$

*Напряжение* химических источников тока отличается от ЭДС на величину падения напряжения на полном внутреннем сопротивлении источника.

Из этих выражений видно, что напряжение разряда  $U_p$  и заряда  $U_z$  зависит от величины тока разряда или заряда и внутреннего сопротивления аккумулятора:

$$U_p = E - I_p R,$$

$$U_z = E - I_z R.$$

*Разрядной ёмкостью* называется количество электричества, отдаваемое источником во внешнюю цепь.

Разрядная ёмкость обозначается символом  $Q$ , измеряется в ампер-часах (А·ч) и определяется уравнением:

$$Q = \int_0^{t_p} I_p dt,$$

где  $t_p$  – время разряда в часах;

$I_p$  – ток разряда в амперах.

Если разряд ведётся при постоянной силе тока, то разрядная ёмкость

$$Q = I_p t_p.$$

Ёмкость химического источника тока зависит от количества активных веществ электродов, конструкции, режима разряда и температуры.

Расход активных веществ на 1 А·ч ёмкости определяется законом Фарадея. По закону Фарадея при расходовании 1 грамм-эквивалента активного вещества освобождается количество электричества, равное 26,8 А·ч.

Не все активные вещества способны вступить в реакцию и освободить количество электричества, рассчитанное по закону

Фарадея. Это происходит по многим причинам, например потому, что продукты реакции закрывают поверхность активных веществ и препятствуют их дальнейшему использованию. Отсюда следует, что чем больше поверхность электродов и больше их толщина, тем больше ёмкость, т.е. очевидна зависимость ёмкости от конструкции. Уменьшение расстояния между электродами приводит к увеличению ёмкости, т.к. уменьшается падение напряжения во внутреннем сопротивлении и тем самым увеличивается время разряда до заданного напряжения.

С увеличением силы разрядного тока ёмкость падает. Разряд большей силы тока характеризуется поверхностным использованием активных веществ. Зависимость ёмкости от тока разряда является важной характеристикой источника тока.

С увеличением температуры электролита ёмкость возрастает до некоторой величины, а затем падает. Повышение температуры выше определённого предела обычно приводит к безвозвратной потере ёмкости на последующих циклах.

Потеря ёмкости при снижении температуры есть явление временное. После отогрева химические источники обычно восстанавливают свою ёмкость.

*Удельной ёмкостью*  $g_0$  химического источника тока называют отношение разрядной ёмкости к массе источника:

$$g_0 = \frac{Q}{m} = \frac{\int_0^{t_p} I_p dt}{m},$$

где  $m$  – масса источника.

*Саморазряд* – потеря ёмкости химическим источником тока при разомкнутой внешней цепи. Саморазряд является следствием как химических процессов, происходящих в источнике при хранении, так и утечек тока при случайных и внешних замыканиях.

Величина саморазряда  $C$  обычно выражается в процентах потери ёмкости в сутки:

$$C = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 T} \cdot 100\%,$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  – ёмкость химического источника тока до и после хранения;  $T$  – время хранения в сутках.

Химические реакции внутри источника происходят вследствие протекания тока внутри электрода, вызванного разностью потенциалов между активной массой и решёткой электрода, а также взаимодействия активной массы и электролита.

Внутренние и внешние замыкания являются следствием загрязнения электролита.

Величина саморазряда зависит от электрохимической системы и конструкции источника. Допустимая величина саморазряда обычно оговаривается техническими условиями.

Саморазряд увеличивается при повышении температуры. Вследствие этого хранение химических источников рекомендуется производить в прохладных помещениях.

*Удельная энергия*  $W_0$  химического источника представляет собой отношение отдаваемой энергии к его массе:

$$W_0 = \frac{\int_0^{t_p} U_p I_p dt}{m},$$

где  $U_p$  – текущее значение напряжения разряда.

Удельная энергия зависит от типа электрохимической системы, величины тока разряда и от конструкции аккумулятора.

*Коэффициент отдачи по ёмкости*  $\eta_Q$  представляет собой отношение отдаваемой ёмкости при разряде источника к ёмкости, необходимой для полного заряда источника тока:

$$\eta_Q = \frac{\int_0^{t_p} I_p dt}{\int_0^{t_3} I_3 dt}.$$

*Коэффициент отдачи по энергии*  $\eta_W$  представляет собой отношение отдаваемой энергии источником тока при разряде к энергии, затрачиваемой для его полного заряда:

$$\eta_W = \frac{\int_0^{t_p} I_p U_p dt}{\int_0^{t_3} I_3 U_3 dt},$$

где  $U_3$ ,  $I_3$ ,  $t_3$  – напряжение, ток и время заряда.

*Сроком службы* аккумуляторов называется количество циклов, которое он выдерживает при определённых режимах разряда и заряда.

Циклом называется процесс разряда и последующего за ним заряда аккумулятора. Срок службы аккумулятора считается законченным, когда его ёмкость станет меньше номинальной на 20-25%.

*Сохранность* является важной характеристикой для гальванических элементов. Сохранностью называется время, в течение которого элемент сохраняет определённый процент номинальной ёмкости.

## 1.4 Применение аккумуляторных батарей в авиации

На самолётах и вертолётах аккумуляторные батареи применяются в качестве буферных и аварийных источников электроэнергии.

Бортовые аккумуляторные батареи предназначены для:

- питания электростартеров и аппаратуры зажигания при автономном запуске авиационных двигателей;
- питания жизненно-важных потребителей во время полёта, при выходе из строя основных источников электроэнергии;
- питания бортовых потребителей электроэнергии при выполнении регламентных работ и проведении предварительной и предполётной подготовки;
- сглаживания пиковых токовых нагрузок при включении мощных бортовых потребителей электроэнергии.

## 2 КИСЛОТНЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ

### 2.1 Применение в авиации

Наибольшее распространение среди кислотных аккумуляторов в авиации получили свинцово-кислотные. Первый работоспособный свинцовый аккумулятор был изобретен в 1859 г. французским ученым Гастоном Планте. Его конструкция представляла собой электроды из листового свинца, разделенные сепараторами из полотна, которые были свернуты в спираль и помещены в сосуд с 10 % раствором серной кислоты. Недостатком первых свинцово-кислотных аккумуляторов была их низкая емкость. Первоначально для ее увеличения проводили большое число циклов заряда-разряда. Для достижения существенных результатов требовалось до двух лет таких тренировок. С тех пор такие аккумуляторы совершенствовались – менялась конструкция используемых в них пластин и сепараторов.

На летательных аппаратах применяются свинцово-кислотные аккумуляторные батареи типа: 12-А-30, 12-САМ-28, 12-САМ-55, 12-АСАМ-23. В качестве аэродромных аккумуляторных батарей применяются: 12-АО-50, 12-АО-52, 12-АСА-140.

В условном обозначении типа аккумуляторной батареи первые цифры (12) указывают на количество аккумуляторов в батарее. Все аккумуляторы соединены последовательно. Буквы означают: А – авиационный, С – стартерный, М – модернизированный, АО – аэродромного обслуживания. Первая буква А в обозначении аккумуляторной батареи 12-АСАМ-23 и 12-АСА-140 обозначает, что её электролит абсорбирован (поглощён) активным веществом электродов и сепараторами. Последние цифры указывают номинальную ёмкость в ампер-часах.

Конструкция аккумуляторов со свободным электролитом однотипна. Отличием являются только размеры и толщина пластин и сепараторов.

Батареи типа САМ предназначены для разряда бóльшими токами, чем батареи типа А. Номинальная ёмкость аккумуляторов типа А соответствует десятичасовому режиму разряда, для типа САМ – пятичасовому.

Батареи типа САМ имеют более тонкие пластины, более пористую активную массу и большее сечение межаккумуляторных соединений и выводов.

Батареи типа А работают при температуре от +50 до -50° С и до высоты 15 км, а типа САМ – до высоты 17-18 км.

В аккумуляторной батарее типа 12-АСАМ-23 с абсорбированным электролитом для увеличения пористости активной массы в неё добавляют моногидрат серной кислоты. С целью получения большего запаса электролита положительных пластин берётся на одну больше, чем отрицательных. Это объясняется тем, что положительные пластины более пористы. В качестве сепараторов используют мипор толщиной 0,5 мм. Сепараторные пластины имеют по пять борозд шириной 1 мм и глубиной 0,2 мм, эти борозды обращены к положительным пластинам. По бороздам поднимаются газы и происходит заполнение электролитом.

Аккумуляторная батарея 12-АСАМ-23 с абсорбированным электролитом может надёжно работать на высотах до 35 км и более при любом пространственном положении.

Аэродромные аккумуляторные батареи 12-АО-50 и 12-АО-52 имеют по два шестикамерных блока, помещённых в деревянный ящик.

Аккумуляторы в батарее 12-АСА-140 имеют отдельные сосуды и размещаются в деревянном ящике с четырьмя секциями по три аккумулятора в секции. Основные технические

характеристики свинцово-кислотных аккумуляторных батарей представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики свинцово-кислотных аккумуляторных батарей

Параметр	12-АСАМ-23	12-АСАМ-28	12-АСАМ-55
Номинальное напряжение, В	24	24	24
Номинальная ёмкость, А.ч	23	28	55
Напряжение аккумуляторов в конце пятичасового разряда, В	1,7	1,7	1,7
Номинально допустимый ток разряда, А	800	750	1500
Длительность запуска авиадвигателя, с	45	45	25
Количество запусков при 25°С	5	4	5
Напряжение батареи в конце запуска, В	16	16	16
Масса батареи, кг	31	28,6	58

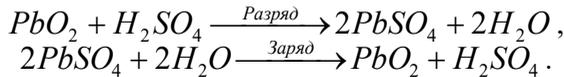
## 2.2 Принцип действия

Электрохимическая система свинцово-кислотного аккумулятора имеет вид:



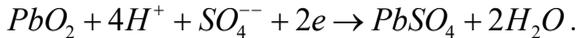
Активным веществом положительного электрода является двуокись свинца, электролитом – водный раствор серной кислоты, а в качестве отрицательного электрода служит губчатый металлический свинец.

Химические реакции, протекающие в аккумуляторе, выражаются следующим уравнением:



Вследствие того, что на обоих электродах в процессе разряда образуется сульфат свинца, уравнение называется уравнением двойной сульфатации. За счёт выделения воды концентрация электролита при разряде уменьшается.

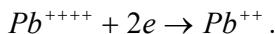
Реакция восстановления на положительном электроде при разряде аккумулятора имеет следующий вид:



Из этого уравнения видно, что вода образуется только у положительного электрода. Перекись свинца  $PbO_2$  хотя почти нерастворима в электролите, при прохождении тока в ограниченных количествах переходит в раствор и при соединении с водой ионизируется на четырёхвалентные ионы свинца  $Pb^{++++}$  и одновалентные ионы гидроокиси  $OH^-$  по уравнению



Электроны, приходящие по внешнему проводнику на положительную пластину, вступают во взаимодействие с ионами  $Pb^{++++}$ :



Двухвалентные ионы свинца, имеющие положительный заряд вступают в реакцию с ионами сульфата  $SO_4^{--}$ , образовавшимися в растворе в результате диссоциации серной кислоты и имеющими отрицательный заряд:



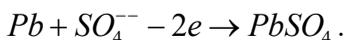
Сульфат свинца  $PbSO_4$  нерастворим в электролите и отлагается на пластинах в виде твердого вещества.

Оставшиеся в растворе ионы  $4H^+$  соединяются с гидроксидной группой  $OH^-$  и образуют воду:



В результате всех реакций при разряде образуются только две молекулы воды, так как две молекулы расходятся в реакции образования четырехвалентного свинца.

Реакция окисления на отрицательном электроде имеет вид:



Свинец отрицательного электрода отдаёт два электрона во внешнюю цепь. В результате чего становится положительно заряженным и вступает в реакцию с ионами сульфата  $SO_4^{--}$ . Образовавшийся сульфат свинца отлагается на отрицательном электроде.

Таким образом, при разряде на обоих электродах образуется сульфат свинца. Сульфат выделяется в виде мелких кристаллов. Если аккумулятор долго не заряжать, то мелкие кристаллы переходят в крупные малорастворимые кристаллы, которые переходят в первоначальные активные вещества, что в итоге ведёт к снижению ёмкости аккумулятора.

При заряде сульфат свинца обоих электродов постепенно переходит в раствор и ионизируется. Вода в растворе также

ионизируется. Двухвалентные ионы свинца у отрицательной пластины получают по два электрона из внешней цепи. В результате чего они нейтрализуются и выделяются на пластине.

Двухвалентные ионы свинца у положительной пластины под действием внешнего поля отдают два электрона и переходят в четырехвалентные ионы свинца.

Четырехвалентные ионы свинца соединяются через промежуточную реакцию с двумя кислородными ионами и образуют перекись свинца, которая выделяется на положительной пластине.

Ионы  $SO_4^-$ , образовавшиеся у каждой пластины, соединяются через промежуточную реакцию с двумя ионами водорода  $H^+$  и образуют серную кислоту. Плотность электролита при этом растёт.

Когда основная масса сульфата свинца на обоих электродах перейдёт в активные первоначальные вещества  $PbO_2$  и  $Pb$ , начнётся электролиз воды. При этом на положительном электроде будет выделяться кислород, а на отрицательном – водород.

### 2.3 Типовая конструкция

Конструкция аккумуляторной батареи 12-САМ-28 является типовой для свинцово-кислотных аккумуляторов и представлена на рис. 2.1.

Аккумуляторные батареи состоят из двенадцати отдельных аккумуляторов, расположенных в ячейках эбонитового моноблока 14 и соединённых между собой перемычками 12. В корпусе моноблока имеется уплотнение 11. К выводным клеммам 13 подсоединяется внешняя нагрузка. Каждый аккумулятор состоит из нескольких положительных 1 и отрицательных 3 пластин. Пластины одной полярности соединяются борном 6, образуют полублок. Два полублока 4 и 17 из пластин разной полярности

вставляются один в другой, так чтобы полярность пластин чередовалась через одну.

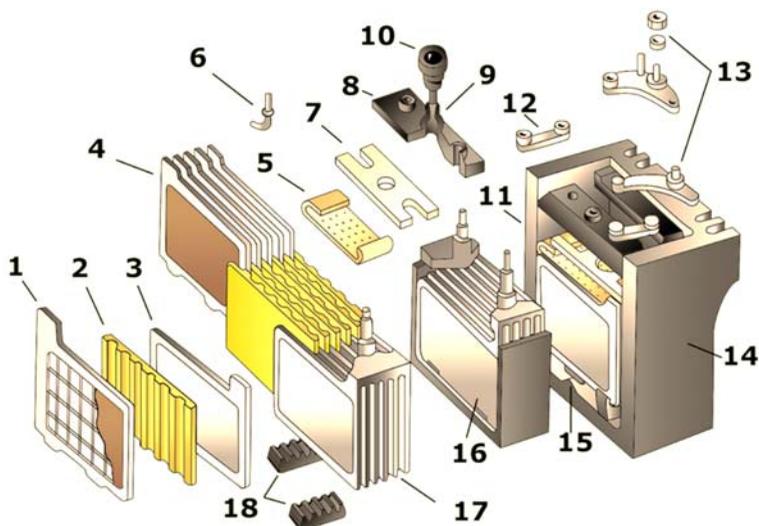


Рис. 2.1 – Конструкция аккумулятора 12-CAM-28

Между пластинами для изоляции вставляются сепараторы 2. Так образуется блок пластин в сборе 16.

Пластины 1 и 3 представляют собой тонкую решётку, в которую впрессовывается активная масса. Активная масса положительных пластин – двуокись свинца, а отрицательных – губчатый свинец. Решётка выполнена из свинца с примесью 6-8 % сурьмы.

Сепараторы 2 представляют собой пористые перегородки, служащие для предохранения пластин разной полярности от короткого замыкания. Чем толще сепаратор, меньше диаметр его пор и больше их извилистость, тем надёжнее защита аккумулятора от коротких замыканий, но меньше его ёмкость, так как увеличивается сопротивление сепаратора. Сепараторы

изготавливаются из различных кислотостойких материалов, например, дерева, эбонита, пластмассы, стекловолокна и др. Сепараторы выполняются в виде листов, гладких с одной стороны и ребристых с другой. Гладкой стороной сепараторы обращены к отрицательным пластинам, а ребристой – к положительным. Это делается для того, чтобы увеличить объем электролита возле положительных пластин.

Увеличение объёма электролита возле положительных пластин необходимо для уменьшения понижения концентрации электролита во время разряда вследствие выделения воды возле положительных пластин.

Для авиационных аккумуляторов наибольшее применение имеют сепараторы из микропористого эбонита мипор. Диаметр пор мипора составляет 3-6 микрон. Сепараторы имеют толщину порядка 0,5 мм.

Блоки пластин 4 и 17 вместе с сепараторами помещаются в отдельные эбонитовые ячейки моноблоков, на дне каждой ячейки имеются опорные призмы 15, на которые опираются выступы положительных пластин. Отрицательные пластины выступов не имеют и опираются на специальные эбонитовые башмачки 18. Призмы и башмачки предохраняют разноимённые пластины от короткого замыкания, возможного при выпадении шлама во время эксплуатации.

Сверху каждая ячейка имеет предохранительный щиток 5, отражательный щиток 7 и крышку 8 с тремя отверстиями: два для выводных штырей-борнов, и одно для заливки электролита.

Отверстие для заливки электролита 9 находится посередине крышки и закрывается специальной пробкой 10. Пробка (рис.2.2) обеспечивает отвод газов, выделяющихся при работе, и предохраняет электролит от выливания при различных эволюциях летательного аппарата.

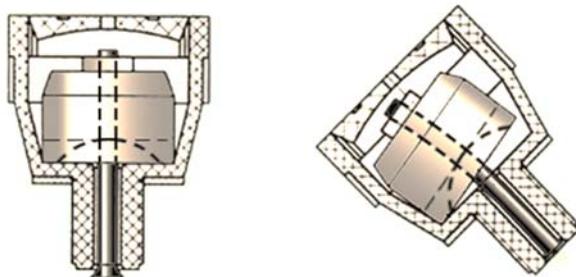


Рис. 2.2 – Рабочая пробка аккумуляторной батареи

## 2.4 Электрические и эксплуатационные характеристики

ЭДС свинцового аккумулятора зависит от плотности и температуры электролита и не зависит от размеров пластин. С повышением плотности электролита ЭДС возрастает. В диапазоне плотности электролита от 1,06 до 1,3 г/см<sup>3</sup> величину ЭДС в вольтах можно с достаточной степенью точности определить по следующей эмпирической формуле:

$$E = 0,84 + \gamma,$$

где  $\gamma$  – плотность электролита при температуре + 25°С.

Формула справедлива, когда плотность электролита между пластинами и в порах пластин одинакова, т.е. через несколько часов после протекания тока через аккумулятор.

Влияние температуры электролита на величину ЭДС незначительно. Температурный коэффициент положителен и примерно равен 0,0004 В на 1°С.

В полностью заряженном аккумуляторе при нормальной температуре величина ЭДС равна 2,11...2,13 В. В разряженном аккумуляторе она снижается до 1,8...1,85 В.

*Внутреннее сопротивление* кислотных аккумуляторов очень мало и составляет тысячную долю ома. Это позволяет получить от аккумуляторов большие стартерные токи при относительно

небольших потерях. Внутреннее сопротивление в основном определяется сопротивлением электролита.

*Сопротивление электролита* зависит от его плотности (рис. 2.3). Наименьшее сопротивление электролит имеет при плотности 1,224 г/см<sup>3</sup>. С ростом плотности сопротивление растет за счет уменьшения диссоциации.

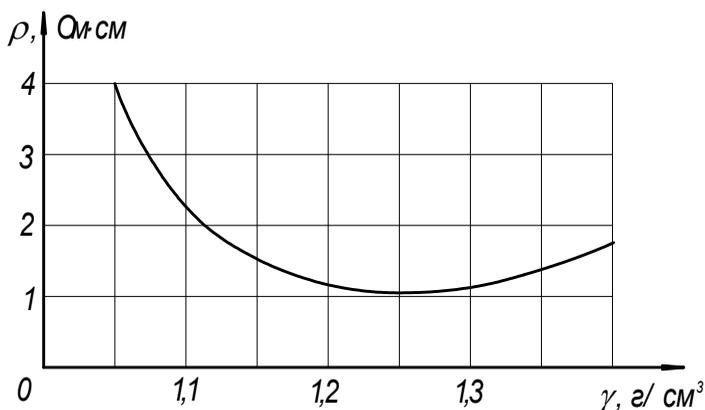


Рис. 2.3 – Зависимость удельного сопротивления электролита от плотности

При разряде и заряде внутреннее сопротивление увеличивается за счет увеличения сопротивления электролита и сопротивления поляризации.

При разряде увеличение сопротивления происходит также и за счет увеличения сопротивления электродов из-за образования на них сульфата свинца, сопротивление которого во много раз больше сопротивления активных веществ.

Если разряд производится большими токами, то внутреннее сопротивление аккумулятора резко увеличивается в связи с тем, что плотность электролита в порах пластин и вблизи них вследствие малой скорости процесса диффузии уменьшается сильнее.

Напряжения заряда и разряда существенно отличаются друг от друга, так как знак падения напряжения на внутренней цепи изменяется:

$$U = E \pm IR.$$

Исходя из особенностей процессов при заряде и разряде рассмотрим более подробно изменение напряжения и причины, вызывающие эти изменения при заряде и разряде.

Номинальными условиями разряда авиационных свинцовых аккумуляторов, при которых гарантируется номинальная ёмкость, является десяти- или пятичасовой режим разряда. При этом конечное напряжение на каждом аккумуляторе должно быть не менее 1,7 В, а на батарее 20,4 В.

Кривые разряда аккумулятора представлены на рис.2.4.

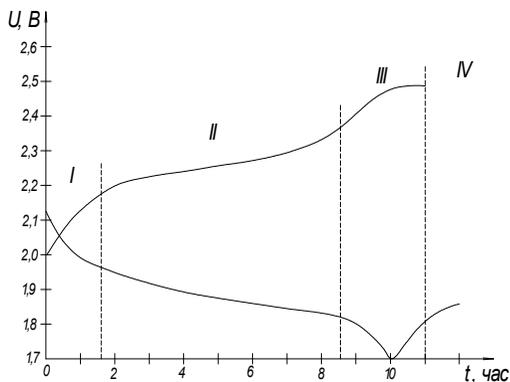


Рис. 2.4 – Изменение напряжения свинцового аккумулятора при заряде и разряде

Кривая напряжения разряда имеет три характерных участка. На участке I наблюдается уменьшение напряжения. Это объясняется тем, что при включении аккумулятора на разряд в порах пластин и вблизи них происходит уменьшение плотности электролита. Это происходит потому, что в самом начале разряда

свежий электролит не успевает проникнуть вглубь пластин из междуэлектродного пространства. Уменьшение плотности электролита на поверхности пластин приводит к уменьшению ЭДС, а следовательно и напряжения.

В дальнейшем на участке II напряжение уменьшается более медленно. Это объясняется тем, что плотность электролита в аккумуляторе по мере его разряда уменьшается, а градиент изменения плотности от пластин в растворе остаётся постоянным. Уменьшение напряжения на этом участке идёт более интенсивно, чем уменьшение ЭДС, так как внутреннее сопротивление аккумулятора увеличивается из-за уменьшения плотности электролита.

На участке III наблюдается более интенсивное падение напряжения. Причиной тому является резкое уменьшение плотности электролита в порах из-за того, что затрудняется диффузия электролита вглубь электродов по причине уменьшения отверстий пор, образовавшихся в процессе разряда, сульфатом свинца. Выпадение сульфата свинца на поверхности электродов приводит к резкому увеличению внутреннего сопротивления аккумулятора, а следовательно и уменьшению напряжения.

При кратковременных режимах разряда большими токами разрядные кривые имеют более крутой наклон. Это объясняется тем, что в реакцию вступают верхние слои вещества электродов. При разрядах большими токами допускается снижение напряжения ниже, чем 1,7 В, и чем больше сила разрядного тока, тем до меньшего напряжения можно разряжать аккумулятор.

После окончания разряда ЭДС несколько возрастает за счёт выравнивания плотности электролита, т.е. повышения его концентрации в порах активного вещества. При понижении температуры разрядное напряжение уменьшается.

Кривая напряжения заряда имеет четыре характерных участка. В начале заряда (участок I) наблюдается резкое повышение разрядного напряжения вследствие резкого увеличения

концентрации электролита в порах активных веществ, а следовательно увеличения э.д.с.

В дальнейшем напряжение возрастает более медленно (участок II), так как образующаяся в порах активных веществ серная кислота диффундирует в междуэлектродное пространство. Крутизна подъёма кривой напряжения на участке II меньше, чем кривой ЭДС. Это объясняется постепенным уменьшением внутреннего сопротивления аккумулятора в процессе заряда вследствие повышения плотности электролита. К концу заряда аккумулятора, когда напряжение достигает величины 2,35...2,40 В (участок III), снова наблюдается резкое повышение напряжения. Оно также связано более резким увеличением концентрации электролита в порах активных веществ, так как процесс восстановления активных веществ проникает вглубь пластин. Поэтому процесс диффузии затрудняется. Кроме того, на этом участке начинается процесс разложения воды. На разложение воды требуется более высокое напряжение, чем для восстановления активных веществ. Процесс разложения воды сопровождается выделением газа, что приводит к увеличению внутреннего сопротивления. В конце участка III напряжение достигает величины 2,55...2,65 В.

На участке IV рост напряжения прекращается, так как процесс заряда на этом участке заканчивается и вся энергия расходуется на электролиз воды. С энергетической точки зрения этот процесс является бесполезным, наряду с электролизом продолжает протекать и основной процесс, хотя и с затухающей интенсивностью. Обильное газовыделение необходимо для перемешивания электролита. В результате электролиза воды плотность электролита практически не увеличивается, так как на разложение одного грамма воды требуется около трёх ампер-часов.

Продолжительность заряда аккумулятора на IV участке составляет около двух часов.

Признаками конца заряда являются:

- 1) обильное газовыделение на обоих электродах;
- 2) постоянство напряжения около 2,6 В;
- 3) постоянство плотности электролита.

Все эти признаки должны выполняться одновременно.

Ёмкость аккумулятора зависит от ряда факторов, основными из которых, как отмечалось выше, являются: количество активных веществ в аккумуляторе, толщина и площадь пластин, температура электролита, величина разрядного тока, срок службы с начала эксплуатации.

Расход активных веществ на А·ч согласно закона Фарадея равен:

PbO <sub>2</sub>	4,46
Pb	3,86
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3,66
Всего	11,98

Естественно, что реализовать все активное вещество для получения электрической энергии не удаётся. Приведённый расчёт является чисто теоретическим и свидетельствует только о возможностях электрохимической системы.

При разряде аккумулятора реакция в первый момент происходит на поверхности пластин, а затем распространяется внутрь их. Поэтому аккумуляторы, имеющие тонкие пластины с большой поверхностью, обладают большей ёмкостью, чем аккумуляторы того же веса активных веществ с толстыми пластинами. Это особенно заметно при разряде аккумуляторов большими токами. Авиационные аккумуляторы имеют более тонкие пластины, чем общепромышленные.

Ёмкость аккумулятора в зависимости от температуры определяется формулой:

$$Q_{\tau} = Q_{25} [1 + \alpha(\tau - 25)],$$

где  $Q_{\tau}$  – ёмкость при температуре  $\tau$ ;  $Q_{25}$  – ёмкость при температуре 25 °С;  $\alpha$  – температурный коэффициент ёмкости;

Принято считать, что уменьшение температуры на 1°С вызывает уменьшение отдаваемой ёмкости примерно на 1%.

С увеличением разрядного тока ёмкость существенно уменьшается. Это наглядно иллюстрируется кривой на (рис. 2.5), характеризующей зависимость ёмкости батареи 12-А-30 от величины разрядного тока.

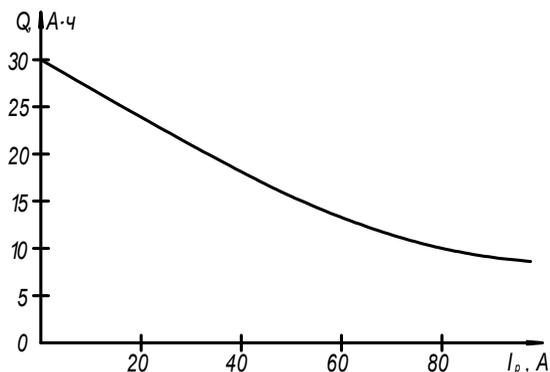


Рис. 2.5 – Зависимость ёмкости батареи 12-А-30 от величины разрядного тока

Ёмкость аккумулятора для разрядных токов, отличающихся от номинального, можно определить по эмпирической формуле:

$$Q = Q_H \left( \frac{I_H}{I} \right)^n,$$

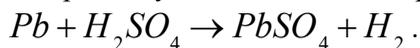
где  $I$  – ток разряда, при котором определяется ёмкость;  $I_H$  – номинальный ток разряда;  $n$  – коэффициент ( $n = 0,2 \dots 0,4$ ).

При разряде аккумулятора при низких температурах или большими разрядными токами аккумулятор отдаёт не всю ёмкость. Часть ёмкости, называемой остаточной ёмкостью, от аккумулятора можно получить в дальнейшем, так, например, при разряде аккумулятора при  $-45^{\circ}\text{C}$  отдаётся только 22% ёмкости, а после нагрева электролита до нормальной температуры аккумулятор ещё отдаёт 55% номинальной ёмкости. Аналогично, после разряда большими токами через некоторое время аккумулятор способен отдать некоторую дополнительную ёмкость. Как говорят, аккумулятор «отдыхает».

Коэффициент отдачи по ёмкости у свинцовых аккумуляторов зависит от полноты заряда, температуры и величины разрядного тока. При нормальных условиях он составляет величину  $\eta_a = 0,85 \dots 0,9$ .

Коэффициент отдачи по энергии составляет величину порядка  $\eta_w = 0,65 \dots 0,75$ .

Саморазряд свинцовых аккумуляторов обусловлен главным образом саморазрядом отрицательных электродов. Он происходит из-за медленного растворения губчатого свинца в серной кислоте:



В конце реакции на пластине выделяется водород.

Саморазряд положительного электрода незначителен и происходит в основном из-за оголения свинцовой решётки электрода. В результате оголения образуется короткозамкнутая пара: свинец- двуокись свинца:



Реакция быстро затухает вследствие образования сульфата свинца, закрывающего оголённое место, и прекращения доступа электролита.

Повышенный саморазряд вызывается небрежным уходом и попаданием в аккумулятор вредных примесей.

Пролитый электролит и грязь образуют токопроводящие мостики между выводами аккумулятора. Наличие вредных примесей может привести к образованию электрохимических систем: примесь – материал электродов и тем самым явиться причиной саморазряда. Так, например, наличие железа приводит к ускоренному саморазряду как положительного, так и отрицательного электродов.

Для приготовления электролита можно пользоваться только специальной аккумуляторной кислотой и дистиллированной водой.

Нормальный саморазряд свинцовых аккумуляторов примерно равен 1% в сутки.

Учитывая давление естественного саморазряда аккумуляторов, их необходимо периодически подзаряжать, если они находятся длительное время в бездействии. Иначе аккумулятор засульфатируется и выйдет из строя.

При работе аккумуляторной батареи происходит постепенное разрушение активных веществ и выпадение их из пластин. Поэтому ёмкость аккумулятора с течением времени уменьшается.

Срок службы аккумуляторных батарей определяется по времени и по числу циклов.

Для бортовых аккумуляторов срок службы определяется только по календарному времени непосредственной работы на летательном аппарате, так как на летательных аппаратах аккумуляторные батареи работают в режиме частичных разрядов и зарядов.

Время работы бортовых аккумуляторных батарей составляет:

12-A-30 и 12-CAM-28	– 2 года;
12-CAM-55	– 1,5 года;
12-ACAM-23	– 1 год.

Для аэродромных аккумуляторных батарей срок службы определяется двумя годами непрерывной эксплуатации и числом циклов. Число циклов для авиационных аэродромных аккумуляторов составляет:

12-A-50	– 50 циклов;
12-AO-52	– 70 циклов;
12-ACA-145	– 75 циклов.

К концу срока службы ёмкость аккумуляторных батарей снижается до 70-75%. Ёмкость аккумуляторной батареи определяется по контрольному циклу заряд-разряд.

Сравнительно небольшой срок службы авиационных аккумуляторов вызван тем, что они имеют небольшую толщину пластин.

### **3 ЩЕЛОЧНЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ**

В авиации наибольшее распространение получили щелочные аккумуляторы следующих видов:

- серебряно-цинковые батареи типа 15СЦС-45Б;
- никель-кадмиевые батареи типа 20НКБН-25 и 20НКБН-40.

#### **3.1 Аккумуляторная батарея 15СЦС-45Б**

##### ***3.1.1 Применение в авиации***

Аккумуляторные батареи 15СЦС-45Б являются аварийными источниками электрической энергии постоянного тока и предназначены:

- для обеспечения автономного запуска авиационных двигателей на земле и в воздухе;
- для питания жизненно важных для самолёта приёмников электрической энергии при отказе в полёте основного источника (стартер-генератора ГСР-СТ-12/40А) до совершения вынужденной посадки;
- для обеспечения связи с командным пунктом при неработающих двигателях.

Расшифровка маркировки:

15 – количество последовательно соединённых аккумуляторов типа СЦК-45Б в батарее;

СЦ – серебряно-цинковая (электрохимическая система);

С – самолётная;

45 – номинальная ёмкость в А·ч (при пятичасовом режиме разряда);

Б – модификация.

### 3.1.2 Принцип действия

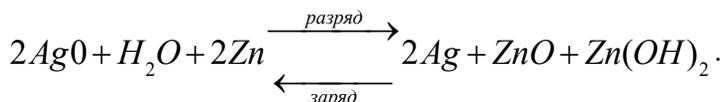
Активным веществом положительного электрода аккумулятора является окись серебра  $Ag_2O$ , а отрицательного – металлический цинк. В качестве электролита используется водный раствор щелочи  $KOH$  с плотностью  $1,46 \text{ г/см}^3$ .

Электрохимическая система изображается:



При разряде серебряно-цинкового аккумулятора окись серебра восстанавливается до металлического серебра, а цинк окисляется.

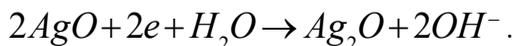
Электрохимические процессы при разряде и заряде аккумулятора могут быть выражены суммарным выражением:



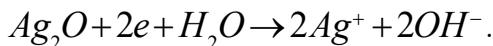
При разряде на отрицательном электроде протекает реакция окисления цинка:



На положительном электроде восстановление окиси серебра до металлического серебра происходит в две ступени. Сначала двухвалентная окись серебра восстанавливается до одновалентной:



ЭДС аккумулятора при этом равна  $1,82 \dots 1,86 \text{ В}$ . На второй ступени, когда аккумулятор разрядится примерно на 30%, происходит восстановление одновалентной окиси серебра до металлического серебра:



ЭДС аккумулятора при этом составляет  $1,52 \dots 1,56 \text{ В}$ . Это изменение э.д.с., примерно на  $0,3 \text{ В}$ , отчётливо видно на кривой разряда аккумулятора (рис. 3.1).

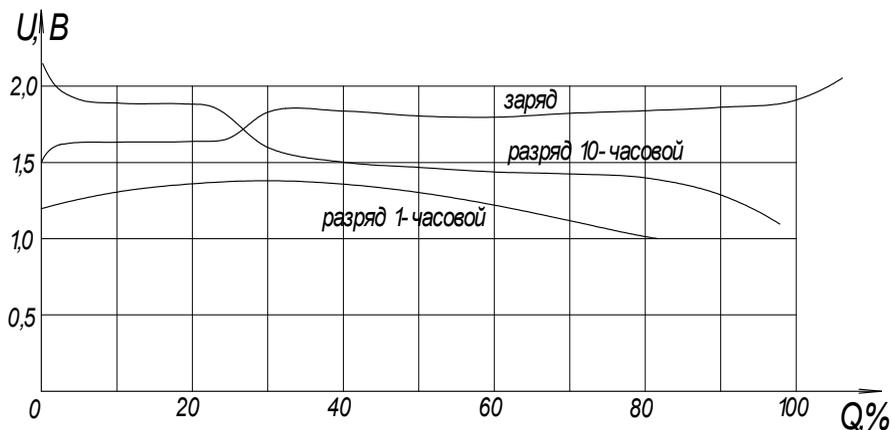


Рис. 3.1 – Изменение напряжения при заряде и разряде

При заряде реакции идут в обратном порядке. На положительном электроде они также идут в две ступени. Скачок напряжения и ЭДС возникает, когда аккумулятор зарядится примерно на 30%. В это время поверхность электрода покрывается двухвалентной окисью серебра.

В конце заряда, когда прекращается окисление серебра из одновалентного в двухвалентное по всей толщине электродов, начинается выделение кислорода по уравнению:



ЭДС аккумулятора при этом повышается на 0,2-0,3 В. Выделяющийся при перезарядке кислород ускоряет процесс разрушения целлофановых сепараторов и появляется возможность возникновения внутренних коротких замыканий.

В процессе заряда вся окись цинка может быть восстановлена до металлического цинка. При перезаряде на отрицательном электроде образуются дендриты, способные протыкать целлофановые плёнки сепараторов и вызывать короткие замыкания. Дендриты не вступают в обратные реакции и поэтому даже кратковременные перезаряды опасны.

Расход активных веществ на 1 А·ч серебряно-цинкового аккумулятора примерно в три раза меньше, чем у свинцового, и равен:

AgO <sub>2</sub>	2,31
Zn	1,22
H <sub>2</sub> O	0,17
Всего	3,7

Степень участия электролита точно не выяснена.

Серебряно-цинковые аккумуляторы являются самыми лёгкими.

Основные технические данные аккумуляторной батареи 15СЦС-45Б представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Параметр	Значение
Номинальное напряжение, В	22,5
Номинальный разрядный ток при пятичасовом режиме разряда, А	9
Номинальная электрическая ёмкость при пятичасовом режиме разряда, А·ч	45
Конечное напряжение разряда батареи, В	15
Расход ёмкости на 1 запуск, А·ч	не более 5
Пределы изменения величины тока во время запуска, А	700...750
Количество запусков при температуре не ниже + 20°С	3
Максимально допустимый разрядный ток, А	750
Ток заряда, А	5
Общая продолжительность нормального заряда, ч	11
Коэффициент отдачи по ёмкости	0,9
Саморазряд, %	0,3
Гарантийный срок службы, месяцев	12

Технический ресурс, месяцев (по указанию ГИ ВВС)	18
Температура окружающей среды, °С	от -50 до +50
Высотность, км	до 25
Масса батареи, кг: - залитой электролитом - сухой	не более 17,5 не более 14,8

### 3.1.3 Устройство и конструкция

Батарея 15СЦС-45Б (рис. 3.2) состоит из 15 последовательно соединённых аккумуляторов СЦК-45Б, помещённых в контейнер из нержавеющей стали.

Аккумуляторы в контейнере расположены в два ряда. В первом ряду помещается 8, а во втором – 7 аккумуляторов. Восьмое место во втором ряду занимает фальшбанка из электроизоляционного материала. Размеры фальшбанки аналогичны размерам аккумулятора СЦК-45Б. Токосъём батареи 15СЦС-45Б может осуществляться через гнезда или штыри фальшбанки.

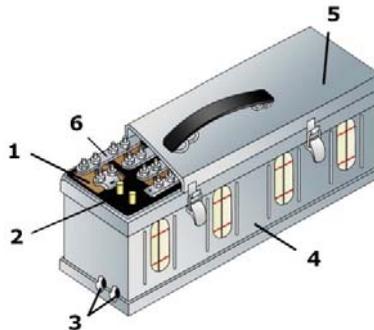


Рис. 3.2 – Аккумуляторная батарея 15СЦС-45Б:  
1 – аккумулятор СЦК-45; 2 – фальшбанка; 3 – гнезда;  
4 – контейнер; 5 – крышка; 6 – шины

Соединение аккумуляторов в последовательную цепь осуществляется медными, посеребрёнными шинами, которые закрепляются на борнах гайками с пружинными шайбами. Контейнер изготовлен из листов нержавеющей стали в виде прямоугольной коробки с откидной крышкой, закрывающейся пружинными замками. В крышке контейнера установлен штуцер для вывода газов, выделяющихся при работе аккумуляторов.

При необходимости может быть осуществлена перестановка штуцера на противоположную сторону крышки контейнера, где для этого предусмотрено запасное отверстие с накидной глухой гайкой. Накидная гайка в этом случае устанавливается на место штуцера.

На дне контейнера уложен резиновый уплотнитель, состоящий из листа губчатой резины. Между рядами аккумуляторов установлена разделительная прокладка. Резиновый уплотнитель и окантовка крышки контейнера обеспечивают амортизацию аккумуляторов и предохраняют их от вертикального смещения. На боковых стенках контейнера с каждой стороны имеется по четыре окна, предназначенных для контроля уровня электролита во всех аккумуляторах.

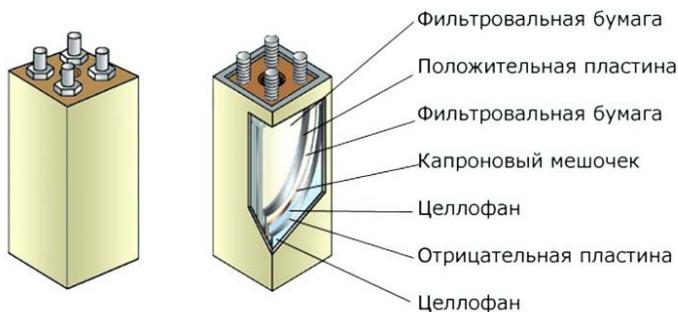


Рис. 3.3 – Аккумулятор СЦК-45Б

Аккумулятор СЦК-45Б (рис. 3.3) устроен следующим образом.

Буква «К» в наименовании аккумулятора означает, что аккумулятор допускает кратковременный режим разряда большими токами.

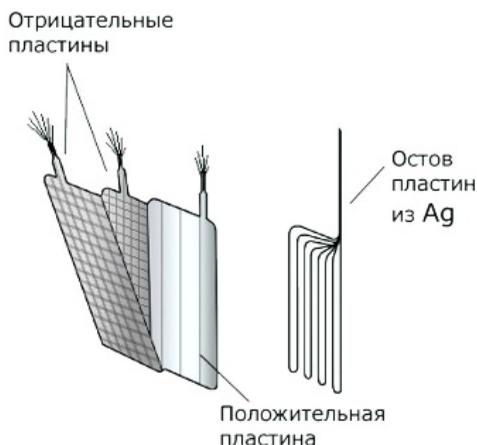


Рис. 3.4 – Структура аккумулятора СЦК-45Б

Каждый аккумулятор содержит 21 положительную и 20 отрицательных пластин, между которыми располагаются сепараторы (рис. 3.4).

Остовы положительных пластин изготовлены в виде сетки из серебряной проволоки толщиной 0,2 мм. Остовом отрицательных пластин является сетка из медной проволоки, покрытой свинцово-оловянистым сплавом. Исходной активной массой положительного электрода является сухой электрохимически активный порошок металлического серебра, а отрицательного электрода – паста, состоящая из смеси окиси цинка и металлического цинкового порошка, увлажнённая раствором поливинилового спирта. Положительные электроды изготовлены способом намазки с последующей завёрткой в специальную бумагу и опрессовкой. Для разделения в электродном пакете электродов разной полярности применена гидратцеллюлозная плёнка (целлофан) толщиной 25

мкм, в которую в 4 слоя попарно завёрнуты отрицательные электроды. Между отрицательными электродами помещается положительный электрод.

Каждый положительный электрод обернут в один слой капроновой ткани, которая препятствует вредному воздействию окиси серебра на целлофановую плёнку. Сепаратор и пластины благодаря высокой пористости впитывают в себя около 90% электролита. Свободного электролита остается немного.

Токоотводы разноимённых электродов припаяны к четырём резьбовым борнам (по 2 на каждую полярность). Борны выводятся на крышку аккумулятора. С верхней стороны крышки одноименные борны соединены между собой перемычками и плотно закреплены гайками. Сосуд аккумулятора изготовлен из прозрачной полиамидной смолы. На сосуд наносятся две красные риски для контроля уровня электролита, который должен быть между ними. В крышке сосуда имеется отверстие для заливки электролита, закрытое ниппельной пробкой. Ниппель выполнен в виде резинового кольца и оттарирован на перепад давления 0,3...1 кгс/м<sup>3</sup>.

### ***3.1.4 Электрические характеристики***

*Электродвижущая сила* полностью заряженной серебряно-цинковой батареи составляет 27,3...27,9 В. После отдачи батареей примерно 30% ёмкости ЭДС уменьшается до 22,6...23,2 В и в дальнейшем остаётся постоянной. Электродвижущая сила батареи мало зависит от температуры электролита.

*Полное внутреннее сопротивление* от степени разрежённости практически не зависит. В процессе разряда наблюдается незначительное уменьшение внутреннего омического сопротивления батареи вследствие образования серебра на положительных электродах и повышение проводимости электролита за счёт повышения температуры.

Поляризация электродов сильно зависит от температуры электролита. Так с уменьшением температуры она увеличивается.

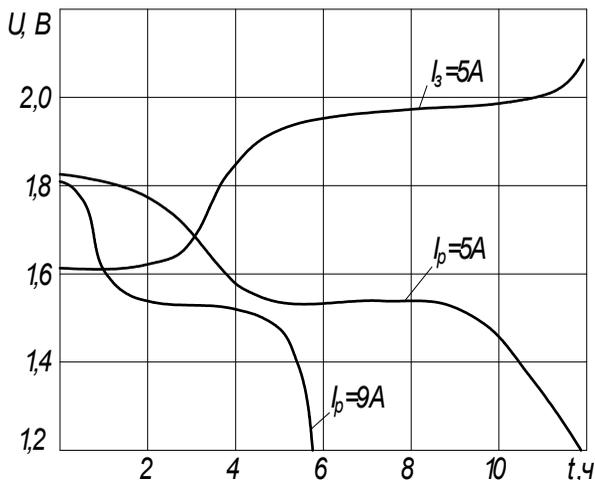
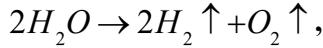


Рис. 3.5 – Зависимость напряжения на клеммах аккумуляторов от величины тока

Вследствие того, что ЭДС и внутреннее сопротивление не зависят от степени разрежённости батареи, напряжение на клеммах батареи также не даёт оснований судить о её фактическом состоянии. Напряжение на клеммах аккумуляторов при разряде зависит от величины тока и температуры электролита (рис.3.5).

С ростом температуры электролита напряжение при разряде увеличивается, а при заряде уменьшается, что обусловлено уменьшением ЭДС поляризации. Допустимое конечное напряжение разряда на серебряно-цинковом аккумуляторе составляет 1,0 В.

Напряжение аккумуляторов при заряде постоянным током изменяется ступенчато, что обусловлено переходом одновалентного серебра в двухвалентное и соответствующим изменением ЭДС. В конце заряда начинается интенсивный электролиз воды из состава электролита:



в результате чего внутреннее сопротивление аккумулятора повышается, при этом напряжение увеличивается на 0,2...0,3В, что служит признаком конца заряда.

Ёмкость аккумуляторных батарей 15СЦС-45Б мало зависит от тока заряда (рис. 3.6).

Однако изменение температуры электролита (рис. 3.7) оказывает на их разрядную ёмкость большое влияние. При температуре  $-25^{\circ}\text{C}$  ёмкость батареи составляет (10...15%)  $Q_{\text{ном}}$  и она не в состоянии разряжаться большими токами без предварительного подогрева. Максимальную ёмкость до (1,1...1,3)  $Q_{\text{ном}}$  батарея отдаёт при температуре  $+35^{\circ}\text{C}$ . При дальнейшем повышении температуры ёмкость батареи резко снижается.

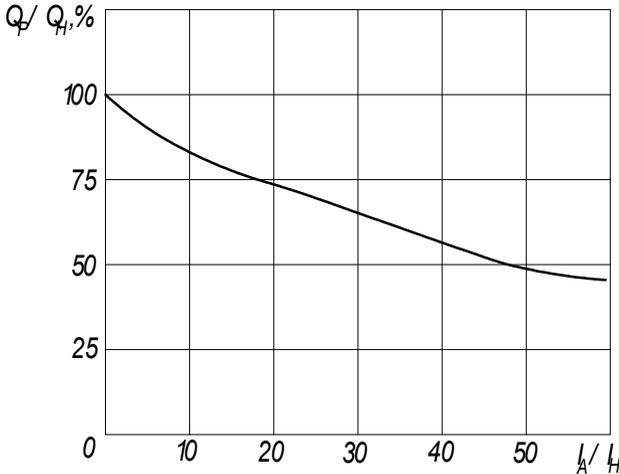


Рис. 3.6 – Зависимость ёмкости аккумуляторных батарей от тока заряда

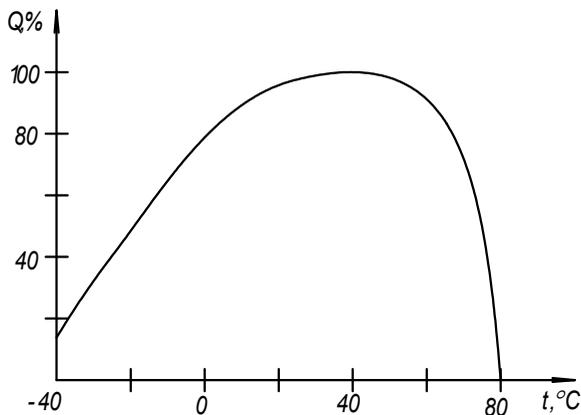


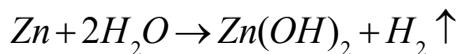
Рис. 3.7 – Зависимость ёмкости 15СЦС-45Б от температуры

Удельная ёмкость аккумуляторных батарей 15СЦС-45Б составляет 2,8 А·ч/кг.

Отдача аккумуляторных батарей по ёмкости и энергии по сравнению с другими типами батарей очень высока:

коэффициент отдачи по ёмкости достигает 94...97%, по энергии – 80...85%.

Саморазряд батарей обусловлен в основном окислением отрицательного электрода:



С повышением температуры саморазряд увеличивается. Так, например, при температуре электролита + 20°C он составляет (0,3...0,4)%  $Q_{\text{ном}}$ , а при + 75°C – свыше 25% в сутки. Гидроксид цинка  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ , растворяясь в электролите, при нормальном заряде не восстанавливается. Следовательно при длительном хранении в серебряно-цинковых аккумуляторных батареях с электролитом и в процессе эксплуатации идёт необратимая потеря ёмкости, что обуславливает ограниченный ресурс батарей этого типа.

При перезарядках серебряно-цинковых аккумуляторов гидроксид цинка, растворенный в электролите, восстанавливается на отрицательном электроде с образованием монокристаллов цинка (дендритов), растущих по мере пропускания тока заряда в направлении положительного электрода. Рост дендритов цинка обуславливает возникновение коротких замыканий между электродами и выход аккумуляторов из строя.

## **3.2 Аккумуляторная батарея 20НКБН-25(40)**

### ***3.2.1 Применение в авиации***

На летательных аппаратах применяются никель-кадмиевые аккумуляторные батареи типа 20НКБН-25 и 20НКБН-40. Первые цифры в обозначении указывают число аккумуляторов в батарее, соединённых последовательно, НКБН – никель-кадмиевая безламельная намазная, последние цифры указывают величину номинальной ёмкости.

Учитывая большую стоимость, малый срок службы и опасность коротких замыканий за последнее время серебряно-цинковые аккумуляторы все больше вытесняются кадмиево-никелевыми безламельными аккумуляторами, особенно на самолётах.

### ***3.2.2 Принцип действия***

Активным веществом отрицательного электрода никель-кадмиевого аккумулятора является губчатый металлический кадмий. Активное вещество положительного заряда состоит из смеси окислов и гидратов окислов никеля с преобладанием гидрата окиси трехвалентного никеля  $Ni(OH)_3$ . Электролитом является водный раствор едкого калия KOH плотностью 1,18-1,4 г/см<sup>3</sup>.

Электрохимическая система никель-кадмиевого аккумулятора изображается следующим образом:



В никель-кадмиевом аккумуляторе используется окислительно-восстановительная реакция между кадмием и гидратом окиси никеля.



Общий состав электролита в аккумуляторе остаётся постоянным, однако концентрация его при разряде понижается у отрицательного электрода и повышается у положительного. При заряде происходит обратный процесс.

Аккумулятор состоит из блока положительных и отрицательных пластин, разделённых сепараторами. Отрицательных пластин на одну больше и они располагаются с краю. Одноименные пластины соединяются между собой посредством мостика, имеющего выводной борн.

Пластины электродов изготавливаются следующим образом. Порошкообразная масса никеля напрессовывается на стальные решётки. Пластина имеет большее количество пор – 80%. Поры заполняются активными веществами. Отрицательные пластины пропитываются солями кадмия, а положительные – солями никеля.

Сепаратором положительной пластины служит капроновый мешочек, а отрицательный – мешочек из щёлочестойкой бумаги. Так сепаратор является двухслойным.

Сосуды авиационных аккумуляторов изготавливаются из полиамидной смолы. Аккумуляторы закрываются пробками с клапаном.

### ***3.2.3 Устройство и конструкция***

Устройство никель-кадмиевого аккумулятора и аккумуляторной батареи показано на рис.3.8.

Корпус аккумуляторной батареи стальной. В одном корпусе размещаются все 20 аккумуляторов. Друг от друга и от корпуса аккумуляторы изолируются плёнкой из винипласта и специальной грунтовкой.

Аккумулятор НКБН-25 представлен на рис. 3.9.

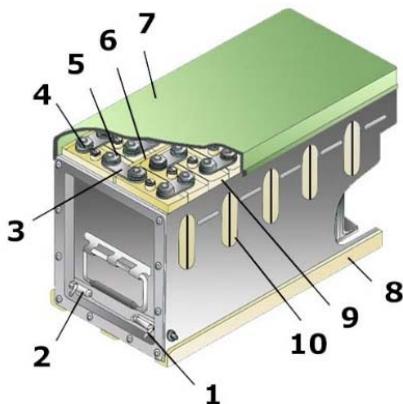


Рис. 3.8 – Аккумуляторная батарея 20-НКБН-25-У3:

- 1 – ручка затвора; 2 – стержень затвора; 3 – шина; 4 – шайба;  
 5 – гайка; 6 – прокладка; 7 – крышка; 8 – уголок; 9 – аккумулятор;  
 10 – окна для контроля уровня электролита

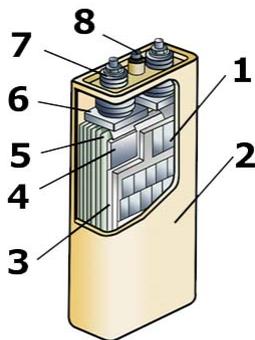


Рис. 3.9 – Аккумулятор НКБН-25:

- 1 – положительная пластина; 2 – корпус; 3 – щелочестойкая бумага;  
 4 – отрицательная пластина; 5 – капроновый мешочек; 6 – мостик;  
 7 – выводы; 8 – пробка

### 3.2.4 Электрические характеристики

Для большей наглядности приведем электрические характеристики никель-кадмиевых аккумуляторных батарей в сравнении со свинцовыми и серебряно-цинковыми.

Основные характеристики аккумуляторов приведены в табл. 3.2 и на рис. 3.10 – 3.12.

Таблица 3.2 – Основные характеристики аккумуляторов

Тип	Срок службы, циклов	Саморазряд за месяц при 20°C	Удельная энергия, Вт·ч / кг				Коэффициент отдачи, %	
			при 20°C	при -20°C	при -40°C	$\eta_Q$	$\eta_W$	
Свинцовый	10-300	20-30	36	18	8	85-90	65-75	
Серебряно-цинковый	50-300	5-10	90	40	6	98-95	85-75	
Кадмиево-никелевый	после 6 месяцев хранения							
Ламельный	450-1000	11-18	20	11	5	67	50	
Безламельный	150-400	15-20	38	26	19	67	50	

Из характеристик видно, что наибольшую удельную энергию имеют серебряно-цинковые аккумуляторы, но при низких температурах это преимущество исчезает и при температуре  $-40^{\circ}\text{C}$  они эквивалентны со свинцовыми и уступают кадмиево-никелевым. При температуре выше  $+50^{\circ}\text{C}$  серебряно-цинковые аккумуляторы неработоспособны.

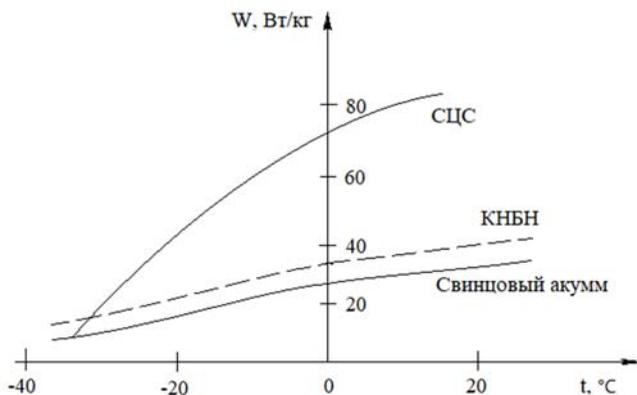


Рис. 3.10 – Зависимость удельной энергии аккумуляторов от температуры

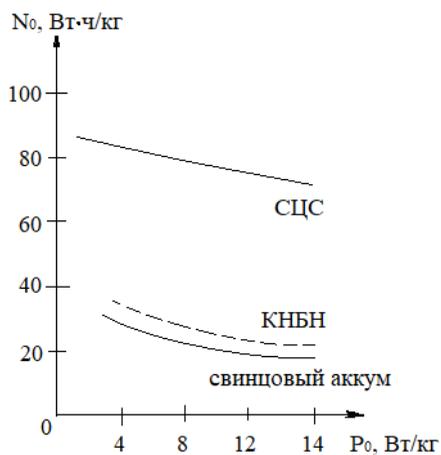


Рис. 3.11 – Зависимость удельной энергии от удельной мощности аккумуляторов

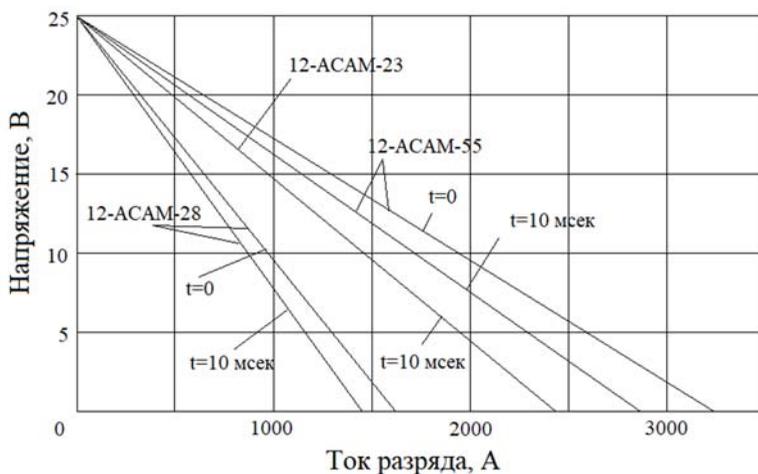


Рис. 3.12 – Вольт-амперные характеристики аккумуляторных батарей 12-САМ-28; 12-САМ-55 и 12-АСАМ-23

ЭДС свежезаряженного аккумулятора примерно равна 1,45 В. В течение нескольких суток после конца заряда происходит падение ЭДС до устойчивой величины 1,36 В. Величина ЭДС от концентрации и температуры электролита практически не зависима.

Внутреннее сопротивление никель-кадмиевых аккумуляторов безламельной конструкции, применяемых на летательных аппаратах, сравнимо с внутренним сопротивлением свинцовых аккумуляторов такой же ёмкости. Поэтому их можно разряжать большими стартерными токами.

Напряжение аккумулятора с увеличением разрядного тока и с понижением температуры уменьшается. На рис. 3.13 приведены разрядные характеристики никель-кадмиевого аккумулятора. Снижение напряжения по мере разряда обусловлено увеличением внутреннего сопротивления главным образом отрицательного электрода.

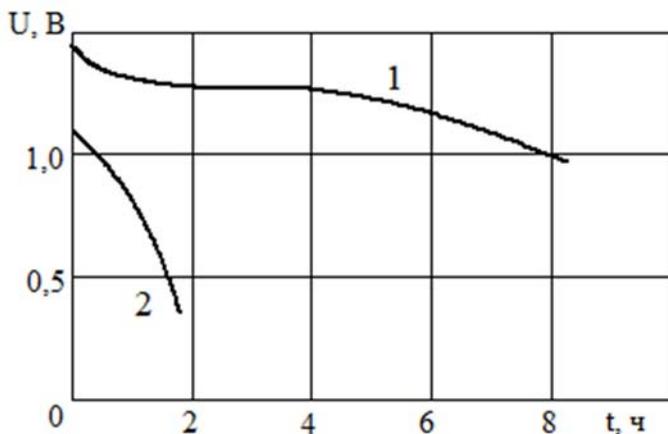


Рис. 3.13 – Изменение напряжения при разряде аккумулятора при температуре окружающей среды 20°C:  
 1 – восьмичасовой режим;  
 2 – одночасовой режим

Заряд аккумулятора обычно производится при постоянной силе тока до напряжения не выше 1,48 В. Величина зарядного напряжения изменяется незначительно. Аккумуляторная батарея полностью может зарядиться от бортового напряжения 28,5 В.

Ёмкость аккумулятора, так же, как и у свинцового аккумулятора, зависит от количества активных веществ, конструкции (толщины и площади пластин), температуры. Особенностью никель-кадмиевых аккумуляторов является то, что их ёмкость меньше зависит от величины разрядного тока.

Расход активных веществ на 1А·ч равен:

Ni(OH) <sub>3</sub>	4,09
Cd	2,10
Всего	6,19

Это почти в два раза меньше, чем у свинцового аккумулятора. Однако реальные массы на 1 А·ч у кислотной и щелочной никель-кадмиевой аккумуляторной батареи практически одинаковы. Это объясняется конструкцией пластин.

Зависимость ёмкости от температуры определяется той же формулой, что и для кислотного аккумулятора, но значение коэффициента в интервале температур от  $-5^{\circ}\text{C}$  до  $+20^{\circ}\text{C}$  равно 0,0034, а для температур ниже  $-5^{\circ}\text{C}$  –  $0,007\text{A}\cdot\text{ч. на градус}$ .

Восстановление ёмкости на борту самолёта у никель-кадмиевой батареи происходит быстрее, чем у кислотной. При положительной температуре за время полёта 2...2,5 часа ёмкость аккумуляторной батареи восстанавливается полностью от бортовой сети напряжением 28,5В, если перед вылетом был произведён запуск от бортовой батареи и её ёмкость составила 45-60% от номинальной.

Самозаряд не превышает 15% в первый месяц хранения, а далее он уменьшается.

Срок службы никель-кадмиевых аккумуляторов достигает нескольких сотен циклов. Они сохраняют работоспособность до температуры  $-35^{\circ}\text{C}$  и до высоты 35км и более.

Сравнительную оценку химических источников тока проводят обычно по удельной энергии. Величина удельной энергии является одной из важнейших характеристик аккумуляторных батарей и химических источников тока различного типа. Она определяется как отношение отдаваемой энергии к её массе. Значение удельной энергии уменьшается с увеличением разрядного тока и удельной мощности. При удельной мощности 50 Вт/кг удельная энергия батареи 15-СЦС-45Б составляет  $60\text{Вт}\cdot\text{ч/кг}$ , для 12САМ-555, 12АСАМ-23, 20КНБН-25 –  $20+23\text{Вт}\cdot\text{ч/кг}$ . Серебряно-цинковые аккумуляторные батареи являются наиболее эффективными для летательных аппаратов.

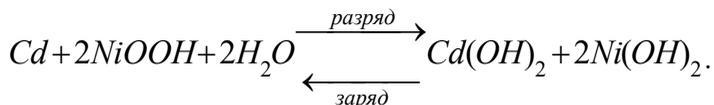
### 3.3 Аккумуляторная батарея 20KSX 22 P

#### 3.3.1 Применение в авиации

Никель-кадмиевая аккумуляторная батарея 20KSX 22 P взаимозаменяема с батареями 15СЦС-45Б, применяется на самолёте МИГ-29 для запуска авиадвигателей на земле и в полете, для питания наиболее важных приёмников в полете при аварийной работе основной системы электроснабжения, а также для обеспечения электроэнергией отдельных приёмников на земле в случаях, когда отсутствует другое электроснабжение.

#### 3.3.2 Принцип действия

Процессы, протекающие на положительных и отрицательных электродах аккумулятора при заряде и разряде, можно представить следующей схемой:



Указанный процесс на электродах аккумулятора протекает обратимо, поэтому батарея может заряжаться и разряжаться многократно. Однако длительная эксплуатация батарей приводит к старению активных масс и износу батарейных и аккумуляторных деталей, что вызывает потерю емкости. Уровень электролита в аккумуляторах FP22H1C в зависимости от степени разреженности и срока хранения батареи в заряженном состоянии изменяется в широких пределах без изменения объема электролита за счет абсорбции (поглощения) активными массами электродов и сепарацией. Однозначное соответствие уровня и объема электролита наблюдается только в конце контрольного или рабочего заряда на полностью заряженной батарее. Категорически запрещается корректирование уровня электролита в межрегламентный период.

### 3.3.3 Устройство и конструкция

Батарея 20KSX 22 Р (рис. 3.14) состоит из 20 аккумуляторов FP22Н1С, помещенных в контейнер 1 из нержавеющей стали и расположенных в нем в два ряда: в первом размещено 15 аккумуляторов, во втором – 5.

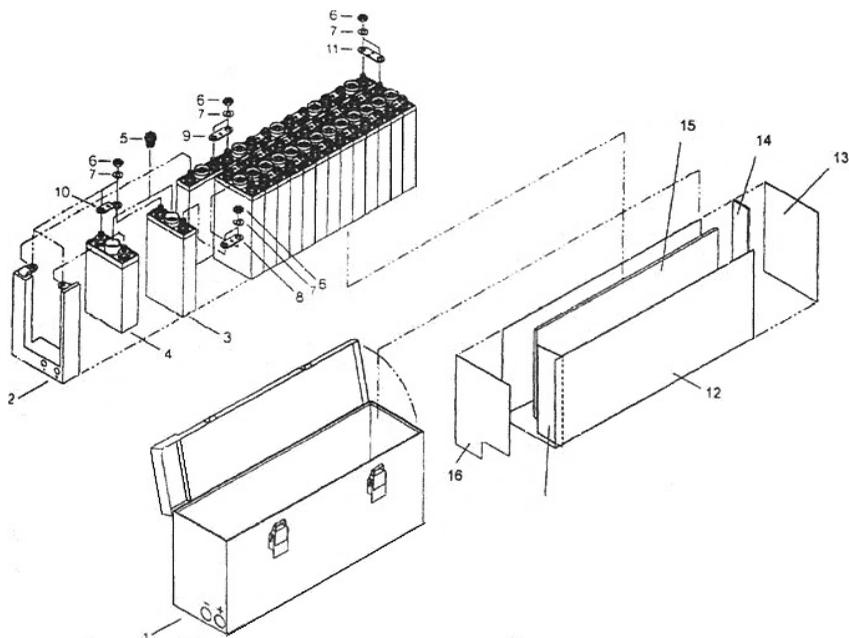


Рис. 3.14 – Устройство аккумуляторной батареи:

- 1 – контейнер батареи; 2 – розетка с выводами; 3, 4 – аккумуляторы;
- 5 – клапан; 6 – гайка М8; 7 – пружинная шайба; 8 – шина Д1;
- 9 – шина Д2; 10, 11 – шины; 12 - 17 – пластины изоляционные

Аккумуляторы 3 в количестве 19 штук имеют одинаковые размеры, аккумулятор 4 имеет меньшую высоту по сравнению с остальными и, для сохранения емкости, большую толщину. Все

аккумуляторы соединены последовательно с помощью 13 шин Д1 8, 4-х шин Д2 9 и по одной шине Д3 10 и Д4 11.

Шины крепятся на аккумуляторах с помощью шайб 7 и гаек 6. Все аккумуляторы пронумерованы. Номер аккумулятора в батарее (условно) равен его порядковому номеру в последовательной цепи батареи; таким образом; аккумуляторы первого (начиная с утолщенного аккумулятора 4), и второго рядов имеют номера соответственно 1-15 и 16-20. Положительный борн первого (утолщенного) и отрицательный борн двадцатого аккумуляторов присоединены к розетке с выводами 2. Розетка с выводами 2 состоит из двух токоведущих шин, на одном конце которых имеются отверстия для присоединения к борнам аккумуляторов, а противоположные концы приварены к соответствующим гнездам. Шины с гнездами размещаются в общем пластиковом П-образном корпусе, состоящем из двух половин, которые крепятся между собой с помощью девяти винтов. К гнездам розетки с выводами подключаются штыри внешней нагрузки.

Аккумуляторы изолированы от корпуса контейнера изоляционными пластинами 12, 13, 16, а между рядами – пластиной 15. Для обеспечения плотности посадки аккумуляторов в контейнере устанавливаются пластины 14, 17; на внутренней стороне крышки контейнера наклеена прокладка из щелочестойкой резины. Для переноски батареи 20KSX 22 P на крышке контейнера предусмотрена ручка. Другая ручка закреплена на задней стенке контейнера; эта ручка служит для удобства установки батареи на объекте эксплуатации.

Аккумулятор FP22H1C (рис. 3.15) состоит из блока 5 положительных электродов с активной массой из оксида никеля и блока 4 отрицательных электродов с активной массой из оксида кадмия. Блоки помещены в сосуд из полиамидной пластмассы 18. Электроды разной полярности изолированы друг от друга щелочестойкой полимерной сепарацией 3.

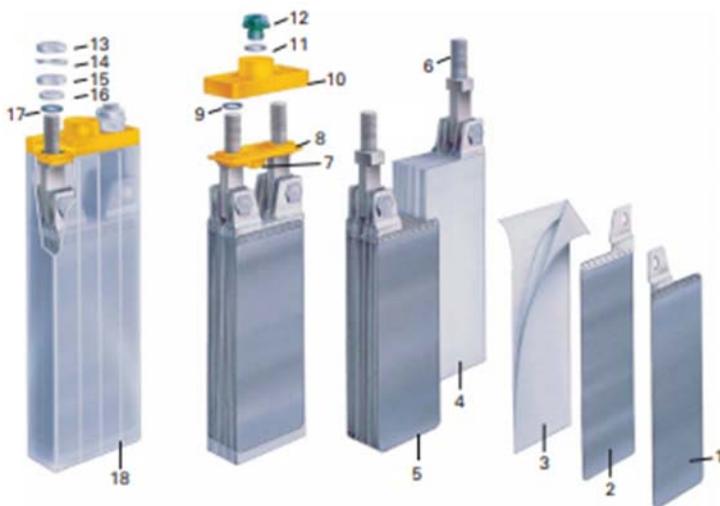


Рис. 3.15 – Устройство аккумулятора FP22H1C:

- 1 – положительный электрод; 2 – отрицательный электрод; 3 – сепарация;  
 4 – блок отрицательных электродов; 5 – блок положительных электродов;  
 6 – отрицательный борн; 7 – указатели уровня; 8 – экран;  
 9 – уплотнительное кольцо; 10 – крышка; 11 – уплотнительное  
 кольцо пробки; 12 – пробка; 13 – верхняя гайка; 14 – пружинная шайба;  
 15 – нижняя гайка; 16 – колпачок ограничительный; 17 – уплотнительное  
 кольцо; 18 – сосуд

Токоотводы электродов соединены с борнами с помощью шпилек и гаек и через отверстия в крышке выведены наружу.

Крышка 10 с тремя отверстиями (два для борнов и одно для горловины) приварена к сосуду. На борны под крышку устанавливаются уплотнительные кольца 9. Через горловину осуществляется выход газов при заряде и производится заливка аккумулятора электролитом и доливка дистиллированной воды, что необходимо при корректировке плотности и уровня электролита в процессе выполнения регламентных работ.

Горловина закрывается пробкой 12 с клапаном, который служит для выравнивания повышенного давления внутри

аккумулятора с давлением окружающего батарею воздуха. Под пробку устанавливается уплотнительное кольцо 11 для предотвращения утечки электролита.

На каждом борне (токоотводе) установлены пружинная шайба 14, верхняя, нижняя гайки 13, 15, уплотнительное кольцо 17 и колпачок ограничительный 16.

Положительный борн отмечен знаком "+" и красной точкой на крышке аккумулятора.

Экран 8 служит для предотвращения выплескивания электролита из аккумуляторов, на нем установлены указатели 7 нормального уровня электролита.

Аккумуляторы залиты электролитом (водный раствор калия гидрат окиси) плотности 1250... 1300 кг/м<sup>3</sup> (1,25...1,30 г/см<sup>3</sup>).

Габаритные размеры аккумулятора 20KSX22P составляют 179-426-137 мм.

### ***3.3.4 Технические характеристики***

Номинальное напряжение батареи 24 В. Масса не более 22 кг. В течение всего срока эксплуатации батарея должна обеспечивать:

- 1 Емкость не менее 22,0 А.ч при разряде током 10 А, время разряда 132 мин;
- 2 Емкость не менее 16,7 А.ч при разряде током 100 А, время разряда 10 мин.

Электрические параметры батарей сохраняются в процессе и после воздействия следующих климатических и механических факторов:

- 1 Температуры окружающего воздуха от плюс 5 °С до плюс 50 °С в течение неограниченного времени.
- 2 После пребывания при температуре от минус 60° до плюс 60° С (до +85 °С в течение 3 часов) с последующим доведением температуры электролита до +5...+50 °С.

- 3 Атмосферного давления до 666,5 Па (5 мм рт. ст.) и изменением высоты со скоростью  $20 \pm 6$  км/мин.
- 4 При относительной влажности воздуха 98 % и температуре +35 °С.
- 5 Линейных ускорений до  $100 \text{ м/с}^2$  (10 g) в трех взаимно перпендикулярных направлениях в рабочем положении (крышкой вверх) кроме направления дно – крышка.
- 6 Вибрации в нормальном положении в диапазоне частот 10...2000 Гц при ускорении  $100 \text{ м/с}^2$  (10 g) с амплитудой колебания не более 1,5 мм.
- 7 Ударов многократного действия ускорением  $120 \text{ м/с}^2$  (12g), длительностью действия 2...20 мс, в 3-х взаимно перпендикулярных направлениях в рабочем положении (кроме направления дно – крышка).
- 8 Ударов одиночного действия ускорением  $150 \text{ м/с}^2$  (15g), длительностью действия 15 мс в трёх взаимно перпендикулярных направлениях кроме положений "крышкой вниз" и "выводом вниз".
- 9 Виброудара (широкополосного случайного вибрационного процесса) в диапазоне частот 10...2000 Гц при максимальном уровне суммарного виброускорения 500 м/с (50g) и суммарном среднеквадратичном значении виброускорения  $150 \text{ м/с}^2$  (15g).

Заряженная батарея при разряде пусковыми токами (рис. 3.16) обеспечивает три включения (пуска) авиадвигателей при температуре электролита от минус 18 °С до +50 °С и одно включение (пуск) при температуре электролита минус 30 °С. Напряжение в конце каждого включения - не менее 16 В.

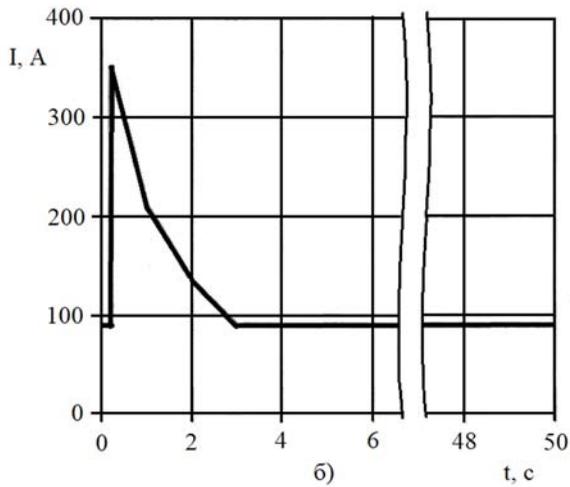
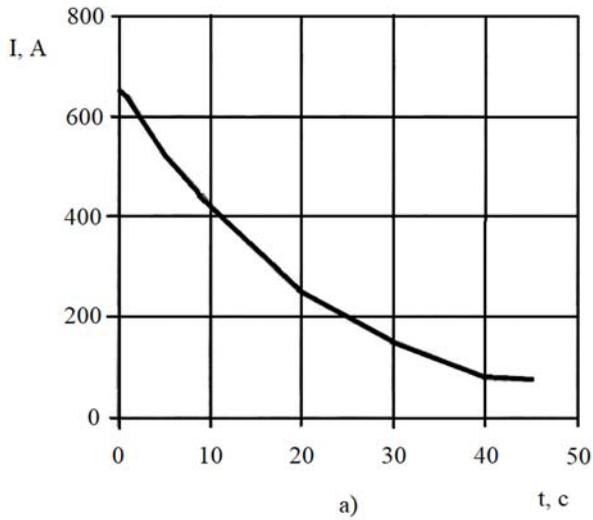


Рис. 3.16 – Изменение тока батареи при стартерном режиме разряда:  
 а) электростартерный запуск авиадвигателей;  
 б) турбостартерный запуск авиадвигателей

Максимально допустимый расход емкости на одно включение не должен превышать 5 Ач.

### 3.4 Никель-металлгидридные аккумуляторные батареи

#### 3.4.1 Применение в авиации

Исследования в области технологии изготовления *NiMH*-аккумуляторов начались в 1970-е годы и были предприняты как попытка преодоления недостатков никель-кадмиевых аккумуляторов. Однако применяемые в то время металл-гидридные соединения были нестабильны и требуемые характеристики не были достигнуты. В результате процесс разработки *NiMH*-аккумуляторов застопорился. Новые металл-гидридные соединения, достаточно устойчивые для применения в аккумуляторах, были разработаны в 1980 году. Начиная с конца 1980-х годов *NiMH*-аккумуляторы постоянно совершенствовались, главным образом по плотности запасаемой энергии.

#### 3.4.2 Принцип действия

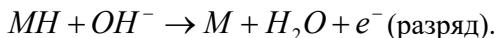
В *NiMH*-аккумуляторах в качестве положительного электрода используется оксидно-никелевый электрод, как и в никель-кадмиевом аккумуляторе, а электрод из сплава никеля с редкоземельными металлами, поглощающий водород, используется вместо отрицательного кадмиевого электрода.

На положительном оксидно-никелевом электроде *NiMH*-аккумулятора протекает реакция:

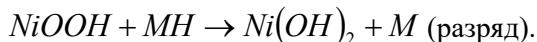


На отрицательном электроде металл с абсорбированным водородом превращается в металлгидрид:





Общая реакция в *NiMH*-аккумуляторе записывается в следующем виде:



Электролит в основной токообразующей реакции не участвует.

### 3.4.3 Электрические характеристики

Основные электрические характеристики *NiMH*-аккумулятора представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 – Основные характеристики

Параметры	<i>NiMH</i>
Номинальное напряжение, В	1,2
Ток разряда, максимальный	4С
Удельная энергия: Втч/кг Втч/л	50-80
	100-270
Срок службы: годы циклы	1-5
	500-2000
Саморазряд, %	20-40 (за 28 сут.)
Рабочая температура, °С	-40 - +60

*Номинальное разрядное напряжение* при нормированном токе разряда, равном 0,1-0,2С (С – номинальная ёмкость одного аккумулятора) при 25°С составляет 1,2-1,25 В, обычное конечное

напряжение – 1 В. Напряжение уменьшается с ростом нагрузки (рис. 3.17).

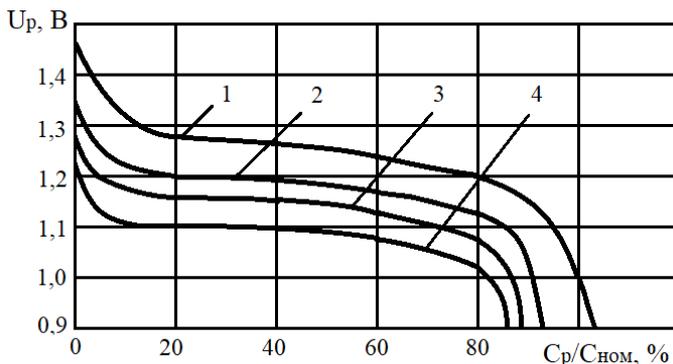


Рис. 3.17 – Зависимость напряжения *NiMH*-аккумулятора от ёмкости

Ёмкость *NiMH*-аккумулятора с повышением нагрузки (уменьшение времени разряда) и при понижении температуры уменьшается (рис. 3.18).

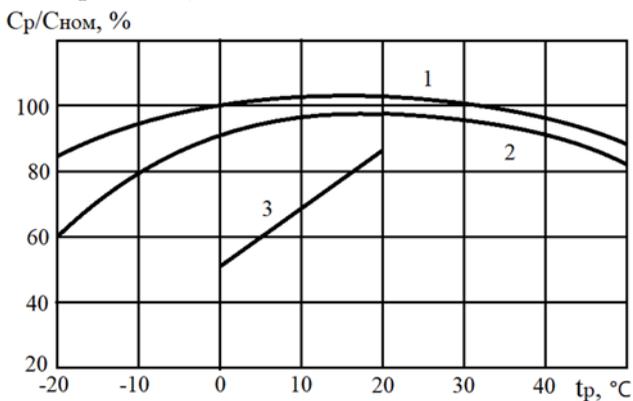


Рис. 3.18 – Зависимость удельной ёмкости от температуры при разном разрядном токе: 1 – 0,2С; 2 – 1С; 3 – 3С

## 4 ПЕРСПЕКТИВНЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ

В России и за рубежом непрерывно ведутся исследования по созданию новых и улучшению характеристик существующих аккумуляторных батарей. Большая доля исследований в этой области отведена аккумуляторным батареям на основе литий-ионных конструкций (Li – Ion) в разных модификациях:

- Литий-марганцевые (LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>);
- Литий-кобальтовые (LiNiCo);
- Литий-никель-марганец-кобальтовые (LiNMC);
- Литий-железо-фосфатные (LiFePO<sub>4</sub>);
- Литий-полимерные (Li-Pol);
- Литий-воздушные (Li-O<sub>2</sub>);
- Литий-серные батареи (Li-S).

В настоящее время аккумуляторные батареи на основе лития, за исключением литий-воздушных и литий-серных, широко эксплуатируются как в авиационной, так и в других отраслях промышленности. Что касается литий-воздушных и серных, то они находятся на завершающих этапах лабораторных исследований.

Кроме этого ведутся разработки и других перспективных аккумуляторов:

- Воздушно-цинковые (Zinc-Air);
- Магниево-серные (Mg - S);
- Фторид-ионные (F – Ion);
- Натрий-ионные (Na-Ion).

Данные перспективные аккумуляторы – за исключением воздушно-цинковых – пока недоступны потребителям, так как не смотря на высокие показатели энергоёмкости, имеют неустранённые проблемы, связанные со сроком их службы.

Воздушно-цинковые применяются только в маломощных миниатюрных устройствах.

Основные направления работ по перспективным аккумуляторным батареям можно свести к следующим положениям:

- Снижение габаритных размеров и массы аккумулятора.
- Повышение электрической ёмкости аккумуляторов. Литиево-серные, литий-железо-фосфатные обладают в 1,5 – 2 раза большей ёмкостью, чем классические литиево-ионные. Ёмкость магниевых батарей, фторид-ионных батарей теоретически в 4 – 8 раз может превышать ёмкость литиево-ионных батарей.
- Увеличение срока службы (количества циклов заряда-разряда).
- Снижения влияния на ёмкость аккумулятора отрицательных температур.
- Взрывобезопасность. Высокая плотность энергии может провоцировать внутреннее короткое замыкание и последующее возгорание аккумулятора.
- Сокращение времени заряда. Небольшое распространение имеют коммерческие варианты литий-нанофосфатных батарей, которые характеризуются высокой отдачей тока и сверхбыстрой зарядкой (15 минут).
- Системы беспроводной зарядки аккумуляторов. Технология основана на использовании индуктивной связи в резонансном режиме между источником и получателем энергии. Благодаря этому потери, связанные с передачей энергии, теоретически не превышают 2%. Аналогично можно передавать не только энергию, но и информацию.
- Создание экологически чистых аккумуляторов. У литий – воздушных батарей вместо оксидов металла в положительном электроде применяется углерод, который

вступает в химическую реакцию с воздухом, в результате чего создается ток. Кислород является практически неисчерпаемым элементом, а самое главное – абсолютно бесплатно берется из окружающей среды.

В настоящее время производятся в потребительских масштабах только литий-полимерные и литий-ионные аккумуляторы, за исключением литий-воздушных и литий-серных. Остальные находятся в стадии исследований и штучного опытного производства, так как пока имеют нерешённые проблемы, связанные со сроком службы, пожаробезопасностью и конструктивными сложностями.

В табл. 4.1 приведены усреднённые сравнительные характеристики производимых промышленностью аккумуляторных батарей.

Таблица 4.1

Параметр	Свинцово-кислотные	Щелочные	Литий-ионные		
			LiNiCo	LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	LiFePO <sub>4</sub>
Удельная плотность энергии, Втч/кг	30-50	45-120	150-190	100-135	90-120
Срок службы, циклы	200-300	300-1000	500-1000	500-1000	2000
Внутреннее сопротивление блок 12 В, мОм	до 100	200 - 600	250-500	80-250	90-180
Саморазряд при 20 <sup>0</sup> С, %/мес.	5	20-30	Не более 10		

Окончание таблицы 4.1

Напряжение на элементе, В	2	1,2	3, 3 – 4,2
Безопасность	Термически стабильны		Возможно самовозгорание
Эффект памяти	Есть		Незначительный
Обслуживание	Требуется периодическое обслуживание		Не требуется

#### 4.1 Литий-ионные аккумуляторы

В 1991 году компания Sony первой в мире начала коммерческий выпуск литий-ионных батарей. За ней последовали и другие производители. В настоящее время литий-ионные аккумуляторные батареи получили широкое распространение в мире. Они обладают лучшими показателями по сравнению с кислотными и щелочными батареями: энергетическая плотность в 1,5 – 2 раза выше, высокие нагрузочные характеристики, незначительный «эффект памяти», не требующий проведения контрольно-тренировочных циклов, высокое напряжение на элементе, малый саморазряд.

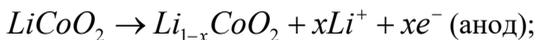
К преимуществам литий-ионных батарей можно отнести и хорошую экологическую безопасность по сравнению с аккумуляторами на основе свинца или кадмия.

Однако, несмотря на хорошие характеристики, в авиации литий-ионные батареи широкого применения пока не имеют. Вероятно это связано с существующими у литий-ионных батарей проблем с пожаробезопасностью и необходимостью применения специальных схем защиты для обеспечения их безопасной работы. На сегодняшний день в авиации такие аккумуляторы используются на беспилотных летательных аппаратах разных типов, размеров и

назначений в качестве основных и аварийных источников электроэнергии постоянного тока.

#### 4.1.1 Принцип действия

Рассмотрим принцип действия на примере литий-кобальтовых батарей. При заряде аккумулятора происходят реакции:



При разряде происходят обратные реакции.

#### 4.1.2 Конструкция

Конструктивно Li-ion аккумуляторы, как и щелочные, производятся в цилиндрическом и призматическом вариантах.

В цилиндрических аккумуляторах свёрнутый в виде рулона пакет электродов и сепаратора помещен в стальной или алюминиевый корпус, с которым соединён отрицательный электрод (рис. 4.1).



Рис. 4.1 – Цилиндрический литий-ионный аккумулятор

Призматический вариант корпуса позволяет более эффективно использовать внутреннее пространство аккумулятора (рис. 4.2).

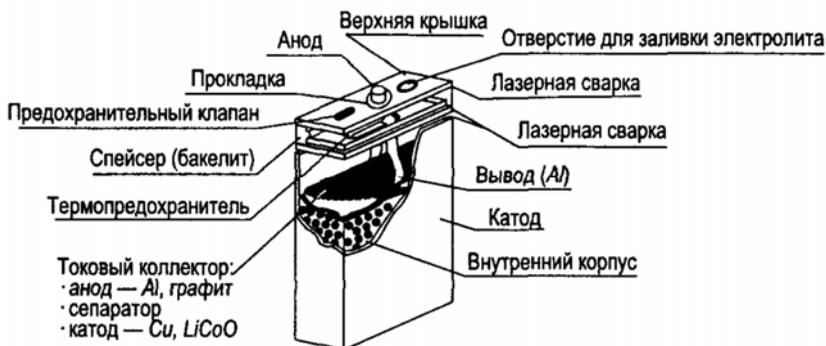


Рис. 4.2 – Призматический литий-ионный аккумулятор

Недостатком призматического корпуса является более низкая по сравнению с цилиндрическим энергетическая плотность, а также более высокая стоимость изготовления.

В первых литий-ионных батареях в качестве материала отрицательных пластин применялся кокс (продукт переработки угля). Позже он был заменён на графит. Графитовые пластины позволили получить более плоскую характеристику разряда, увеличить напряжение на элементе более 3В, более высокий ток разряда.

В качестве положительных пластин литий-ионных батарей применяют сплавы лития с кобальтом (литий-кобальтовые батареи) или с марганцем (литий-марганцевые батареи). Литий-кобальтовые батареи служат дольше, а литий-марганцевые – значительно безопасней при эксплуатации и их производство дешевле из-за более низкой стоимости сырья.

В корпус литий-ионных батарей встроена схема защиты или термопредохранитель. Схема защиты ограничивает пиковое напряжение на каждом элементе в процессе заряда и предупреждает падение напряжения ниже допустимого значения при разряде.

Также схема ограничивает зарядный и разрядный токи, обеспечивает мониторинг температуры батареи. В литий-марганцевых батареях схема защиты может отсутствовать. Благодаря наличию марганца при перезаряде взрывоопасные реакции металлизации анода и выделения кислорода на катоде происходят настолько медленно, что вздутие и воспламенение батареи не происходит.

### *4.1.3 Электрические характеристики*

Характеристики литий-ионных аккумуляторов зависят от химического состава составляющих компонентов и варьируются в следующих пределах:

- напряжение единичного элемента:
  - номинальное: 3,7 В;
  - максимальное: 4,2 или 4,4 В;
  - минимальное: 2,5-2,75-3,0 В;
- удельная энергоёмкость: 110 ... 243 Втч/кг;
- внутреннее сопротивление: 5 ... 15 мОм/Ач;
- число циклов заряд/разряд до достижения 80 % ёмкости: 600;
- время быстрого заряда: 15 мин ... 1 ч;
- саморазряд зависит от температуры хранения и степени заряда. При температуре 25 °С и заряде 100%  $\approx$ 1,6 % в месяц;
- ток нагрузки относительно ёмкости С, представленной в А.ч:
  - постоянный: до 65С;
  - импульсный: до 500С;
  - оптимальный: до 1С;
- диапазон рабочих температур: от  $-20$  °С до  $+60$  °С (наиболее оптимальная  $+20$  °С);

#### *4.1.4 Особенности эксплуатации*

Li-ion аккумуляторы неприхотливы в эксплуатации. Однако при эксплуатации необходимо учитывать некоторые особенности их работы.

- 1) Li-ion аккумуляторы подвержены «старению» в независимости от того, как они использовались. Хранение батареи в прохладном месте ( $15^{\circ}\text{C}$ ) замедляет процессы старения до 40%.
- 2) Li-ion категорически запрещается разбирать! В случае протечки электролита и его попадания на открытые участки кожи или в глаза следует немедленно тщательно промыть их чистой водой и обратиться к врачу.
- 3) Случайный перезаряд Li-ion батареи может быть опасен. При перезаряде на катоде активно выделяется кислород и температура батареи растёт. Необходимо применение устройств защиты, предупреждающих превышение напряжения заряда выше порогового значения, а также элементов защиты по температуре, прекращающих заряд, если температура батареи достигнет  $90^{\circ}\text{C}$ .

Процесс заряда литий-ионных батарей подобен заряду свинцово-кислотных и щелочных аккумуляторов. Отличия состоят в следующем:

- 1) более высокое напряжение на элементе литий-ионных батарей;
- 2) не требуется компенсационный заряд при полном заряде батареи;
- 3) более высокая точность регулирования напряжения элемента батареи.

При заряде Li-ion аккумуляторных батарей током 1А время заряда составляет 2-3 ч. Li-ion батарея достигает состояния полного заряда, когда напряжение на ней становится равным напряжению отсечки, а ток при этом значительно уменьшается и составляет

примерно 3% от начального тока заряда. На рис. 4.3 представлен график цикла заряда литий-ионных батарей.

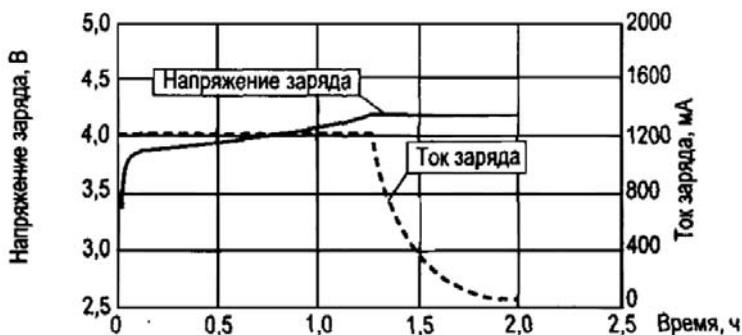


Рис. 4.3 – График цикла заряда литий-ионных батарей

Как правило литий-ионные батареи авиационного применения имеют заниженное напряжение полного заряда на элементе по сравнению с бытовыми батареями, соответственно меньшую электрическую ёмкость, однако за счёт этого – больший срок службы.

## 4.2 Литий-полимерные аккумуляторы

Возможность замены жидкого органического электролита на полимерный, при котором должна снизиться вероятность его утечек и увеличиться безопасность работы литий-ионного аккумулятора, изучалась с самого начала коммерциализации этих источников тока.

В основе идеи литий-полимерного аккумулятора (Li-pol) лежит открытое явление перехода некоторых полимеров в полупроводниковое состояние в результате внедрения в них ионов электролита. Проводимость полимеров при этом увеличивается

более чем на порядок. Усилия исследователей были направлены на поиск полимерных электролитов как для литий-ионных аккумуляторов, так и для аккумуляторов с металлическим литием, теоретически возможная плотность энергии которых в несколько раз больше, чем у литий-ионных аккумуляторов.

К настоящему времени разработаны и серийно изготавливаются литиевые источники тока с электролитами, которые могут быть подразделены на три группы:

- сухие полимерные электролиты (чаще всего на базе полиэтиленоксида, в который вводятся различные соли Li);
- гель-полимерные гомогенные электролиты, которые образуются при внедрении в полимер (или смесь полимеров) с солями Li пластификатора-растворителя;
- неводные растворы солей Li, сорбированные в микропористой полимерной матрице.

По сравнению с жидкими электролитами в литий-ионных аккумуляторах полимерные электролиты имеют меньшую ионную проводимость, которая к тому же понижается при температуре ниже нуля. Поэтому проблема разработок Li-pol аккумуляторов состояла не только в поиске иммобилизованного электролита с достаточно высокой проводимостью, совместимого с электродными материалами, но и в расширении температурного диапазона Li-pol аккумуляторов.

Современные литий-полимерные аккумуляторы обеспечивают удельные характеристики, сравнимые с характеристиками литий-ионных аккумуляторов. Благодаря отсутствию жидкого электролита они более безопасны в использовании, чем перезаряжаемые литиевые источники тока. Li-pol аккумуляторы компактны и могут быть выполнены в любой конфигурации. Их контейнер может быть выполнен из металлизированного полимера.

Рабочие плотности тока, однако, незначительны, и электрические характеристики Li-pol аккумуляторов заметно

ухудшаются при понижении температуры из-за кристаллизации полимера.

Учитывая, что уже реально показаны возможности создания литий-полимерных аккумуляторов в широком диапазоне емкостей, и тот факт, что при всех стандартных тестах на безопасность использования (перезаряд, форсированный разряд, короткое замыкание, вибрация, раздавливание и протыкание гвоздем) Li-pol аккумуляторы имеют существенно более высокие показатели по сравнению с литий-ионными аккумуляторами с жидким электролитом. Перспективы серьезного расширения производства Li-pol аккумуляторов и использования их в самых разнообразных областях техники не вызывают сомнений. В табл. 4.2 представлены результаты испытаний аккумуляторов на безопасность.

Таблица 4.2

Вид испытаний	Аккумулятор с гель-полимерным электролитом	Аккумулятор с жидким электролитом
Прокол иглой	Не было изменений	Взрыв, дым, протечка электролита, повышение температуры до 250°C
Нагрев до 200°C	Не было изменений	Взрыв, протечка электролита
Ток короткого замыкания	Не было изменений	Протечка электролита, повышение температуры на 100°C
Перезаряд (600%)	Вздутие	Взрыв, протечка электролита, повышение температуры на 100°C

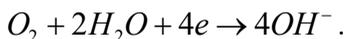
Процесс заряда литий-полимерных аккумуляторных батарей подобен заряду литий-ионных аккумуляторных батарей. Литий-полимерные батареи с глеевым электролитом чаще всего классифицируют как литий-ионные, и их процессы заряда аналогичны.

### 4.3 Воздушно-цинковые аккумуляторы

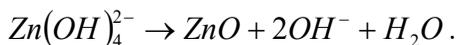
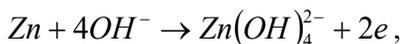
Одним из перспективных направлений исследований аккумуляторных батарей являются воздушно-цинковые элементы. Аноды таких элементов изготавливаются из цинка, а катодом является воздушный (газовый) электрод. В качестве электролита применяется водный раствор гидроксида калия.

Энергоёмкость воздушно-цинковых элементов гораздо выше, чем у литий-ионных и теоретически составляет 1350 Вт·ч/кг. Однако широкому распространению препятствует короткий срок эксплуатации, связанный с высыханием электролита.

На катоде происходит реакция электровосстановления кислорода, продуктами которой являются отрицательно заряженные гидроксид-ионы:



Гидроксид-ионы движутся в электролите к цинковому аноду, где происходит реакция окисления цинка с высвобождением электронов, которые через внешнюю цепь возвращаются на катод:



В настоящее время воздушно-цинковые аккумуляторы применяются в основном для питания слуховых аппаратов, в авиации применения пока не нашли.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В учебном пособии были рассмотрены различные типы аккумуляторных батарей. Представлена их конструкция, принцип действия и технические характеристики. Показано применение на борту воздушных судов. Отмечены достоинства и недостатки того или иного типа аккумуляторной батареи.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Синдеев, И.М. Системы электроснабжения воздушных судов [Текст] / И. М. Синдеев, А.А. Севелов. – Москва: Транспорт, 1990. – 210 с.
2. Зотов, В.М. Системы электроснабжения летательных аппаратов [Текст] / В.М. Зотов, Б.В. Куприн. – Москва: ВВИА Н.Е. Жуковского, 1988. – 110 с.
3. Основы электрооборудования летательных аппаратов [Текст] / Д.Э. Брусникин, Н.Т. Коробан, В.Т. Морозовский [и др.]. – Москва: Высшая школа, 1978. – 163 с.
4. Лебедев, А.А. Автоматическое и электрическое оборудование летательных аппаратов [Текст] / А.А. Лебедев. – Москва: Военное издательство министерства обороны СССР, 1979. – 187 с.
5. Хрусталеv, Д.А. Аккумуляторы [Текст] / Д.А. Хрусталеv. – Москва: Изумруд, 2003. – 224с.

Учебное издание

*Кириллов Алексей Владимирович,  
Ковалёв Михаил Анатольевич,  
Соловьёв Вячеслав Иванович*

## **АВИАЦИОННЫЕ АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ**

*Учебное пособие*

Редактор Н.С. Куприянова  
Компьютерная вёрстка А.В. Ярославцевой

Подписано в печать 19.10.2020. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 5,0.  
Тираж 120 экз. (1-й з-д 1-25). Заказ . Арт. – 8(Р2У)/2020.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
443086, САМАРА, МОСКОВСКОЕ ШОССЕ, 34.

---

Издательство Самарского университета.  
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**

**ДЛЯ ЗАМЕТОК**