

УДК 629.7.064.52

Результаты разработки и наземной отработки литий-ионной аккумуляторной батареи космического назначения

Мансуров В.С.*, Московкин С.А., Ребров С.Г.***, Янчур С.В.******

Исследовательский центр имени М.В. Келдыша,

Онежская ул., 8, Москва, 125438, Россия

**e-mail: mvs742009@yandex.ru*

***e-mail: sergey.a.moskovkin@mail.ru*

****e-mail: rebrov_sergey@mail.ru*

*****e-mail: y3862@yandex.ru*

Аннотация

Разработана конструкция литий-ионной аккумуляторной батареи космического назначения. Проведены экспериментальные исследования электрических и тепловых характеристик при циклической работе на различных режимах, соответствующих работе батареи на геостационарной орбите и низкой околоземной орбите, как в вакууме, так и в нормальных климатических условиях.

Ключевые слова: литий-ионный аккумулятор, проводимость, разрядная емкость, скорость разряда, температурный режим, энергоемкость.

Введение

Химические источники тока являются одной из наиболее важных составляющих систем электроснабжения (СЭС) космических аппаратов. Именно они во многом определяют энергетические и эксплуатационные параметры СЭС в целом. Поэтому повышение их энергоемкости, коэффициента полезного действия (КПД), расширение диапазона условий эксплуатации позволяет не только расширить сферу

их собственного применения, но и совершенствовать те средства, в которых они применяются.

Литий-ионные аккумуляторные батареи (АБ) характеризуются высокими удельными характеристиками, малым саморазрядом, широким диапазоном рабочих температур, высоким ресурсом. Указанные преимущества делают литий-ионные аккумуляторные батареи привлекательными у разработчиков КА (отечественных и зарубежных).

В ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша» разработана конструкция [1] и проведен полный цикл наземных испытаний на подтверждение электрических характеристик во всех условиях эксплуатации литий-ионной аккумуляторной батареи (ЛИАБ-50). В работах принимали участие ОАО «НИИЭИ» (г. Электроугли) и ЗАО «ТЕХКОМ» (г. Москва).

Описание конструкции батареи

В состав литий-ионной аккумуляторной батареи входят:

- восемь последовательно электрически соединённых литий-ионных аккумуляторов (ICNP 30/133/190/HE), разработки ОАО «НИИЭИ»;
- блок электроники разработки ЗАО «ТЕХКОМ», предназначенный для:
- поэлементного измерения напряжения, температуры и тока в АБ;
- анализа информации об измеренных параметрах АБ и её защиты от перезаряда, переразряда и перегрева путём формирования для блока управления системы электроснабжения космического аппарата предупреждающих и аварийных сигналов для изменения режимов работы АБ;

- защиты АБ от единичного отказа литий-ионного аккумулятора (ЛИА);
- формирования и передачи в бортовую электронную вычислительную машину массива телеметрической информации о состоянии АБ;
- элементы конструкции общей сборки батареи.

Литий-ионные аккумуляторы (ICNP 30/133/190/HE), разработанные и изготовленные ОАО «НИИЭИ», номинальной емкостью 50 А·ч, с натуральным сферолизированным графитом в качестве анодного материала и с литий-никель-кобальт оксидом в качестве катодного материала, имеют призматическую форму и предназначены для размещения в составе аккумуляторной батареи в негерметичном отсеке космического аппарата [2].

В таблице 1 приведены технические характеристики аккумуляторной батареи.

Таблица 1

Технические характеристики аккумуляторной батареи

| Параметр | Значение |
|----------------------------|-----------------|
| Номинальная емкость, А·ч | 50 |
| Напряжение батареи, В | от 32,8 до 22,4 |
| Напряжение аккумулятора, В | от 4,1 до 2,8 |
| Удельная энергия, Вт·ч/кг | > 120 |
| Масса, кг | < 20 |

В таблице 2 приведены технические характеристики блока электроники.

Таблица 2

Технические характеристики блока электроники

| Параметр | Значение |
|--|----------|
| Количество каналов контроля напряжения аккумулятора, шт. | 8 |

| | |
|---|-----------------|
| Диапазон измерения напряжения, В | от 0,1 до 4,5 |
| Точность измерения напряжения, мВ | ± 20 |
| Количество каналов контроля температуры аккумулятора, шт. | 8 |
| Диапазон измерения температуры, °С | от – 50 до + 70 |
| Точность измерения температуры, °С | ± 1 |
| Тепловыделение, Вт, не более | |
| – в режиме контроля напряжения и температуры | 3 |
| – в режиме выравнивания | 8 |

Аккумуляторная батарея предназначена для установки в негерметичном отсеке космического аппарата. Внешний вид аккумуляторной батареи приведен на рисунке 1.

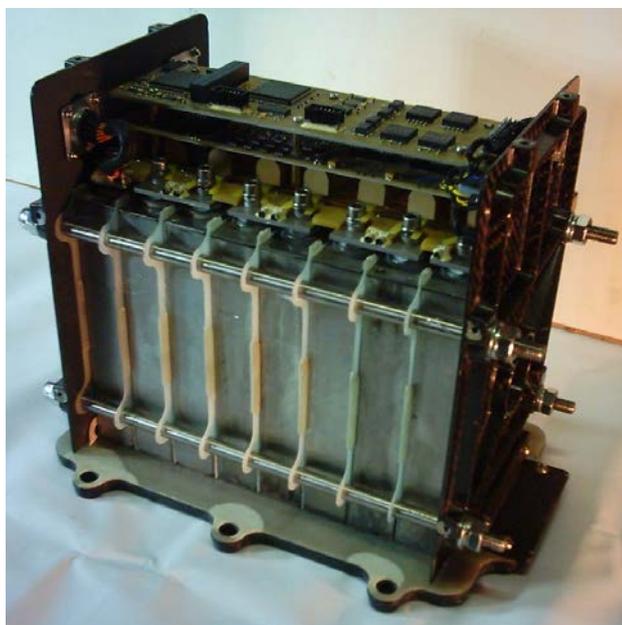


Рис. 1. Внешний вид аккумуляторной батареи ЛИАБ-50

Аккумуляторы в батарее располагаются на охлаждаемом нижнем основании (днище) между двумя боковыми стенками, которые стянуты четырьмя силовыми шпильками, воспринимающими усилия от теплового расширения и изменения

размеров аккумуляторов в процессе заряда и разряда. Между собой и от боковых стенок аккумуляторы отделяются электроизоляционными проставками. На одной боковой стенке с внешней стороны располагаются силовые клеммы аккумуляторной батареи. На другой боковой стенке с внешней стороны располагаются клеммы блока электроники. Блок электроники располагается наверху батареи, посредством винтового крепления к борнам аккумуляторов. В состав аккумуляторной батареи также входит устройство активного выравнивания напряжения аккумуляторов при заряде и разряде.

Методика проведения экспериментов

При проведении испытаний использовались: электронная нагрузка ВК 8520 фирмы ВК Precision; в качестве зарядного устройства использовался программируемый источник питания XLN-3640 той же фирмы. Испытания проводились как в вакууме, так и в нормальных климатических условиях. В процессе испытаний проводились измерения параметров (ток, напряжение, температура аккумуляторов) и сбор аналоговых данных контрольно-измерительной аппаратурой с последующей их записью в цифровом виде в памяти персонального компьютера. Перечень контролируемых параметров и средств контроля при проведении испытаний представлен в таблице 3.

Таблица 3

Перечень контролируемых параметров и средств контроля при проведении
испытаний

| Наименование контролируемого параметра | Пределы изменения параметра | Погрешность измерения | Средства измерения | | АЦП |
|--|-----------------------------|-----------------------|--------------------|-----------|-----|
| | | | Наименование | Тарировка | |
| | | | | | |

| Наименование контролируемого параметра | Пределы изменения параметра | Погрешность измерения | Средства измерения | | АЦП |
|--|-----------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------|-----------|
| | | | Наименование | Тарировка | |
| Напряжение на борнах аккумуляторов при заряде и разряде, В | 0-4,2 | $\pm 0,15\%$ | LTR27, БЭ | Вольтметр цифровой В7-37 | LTR27, БЭ |
| Сила тока заряда и разряда, А | 0-100 | $\pm 0,15\%$ | образцовый шунт 75 А/75 мВ | | LTR27 |
| Электрическая емкость при заряде и разряде, А·ч | 0-200 | | определяется расчетным путем | | |
| Энергоемкость при заряде и разряде, Вт·ч | 0-3000 | | определяется расчетным путем | | |
| Температура ЛИА и окр. среды, °С | 0-200 | $\pm 0,1$ | терморезистор HEL-775 | образцовый термометр | LTR27, БЭ |
| Время с начала испытаний, сек. | 10^5 | $\pm 0,01$ | системный таймер ПК | | |

На рисунке 2 схематически приведено расположение терморезисторов, опрашиваемых измерительной системой LTR, на поверхности аккумуляторной батареи при проведении испытаний (Т1 – аккумулятор №4, на высоте 5 мм от основания по узкой стороне аккумулятора; Т2 – аккумулятор №4, на высоте 65 мм от основания; Т3 – аккумулятор №4, на высоте 115 мм от основания по узкой стороне аккумулятора; Т4 – аккумулятор №4, на высоте 170 мм от основания по узкой стороне аккумулятора; Т5 – аккумулятор №4, на плате сопряжения у

положительного борна; T6 – аккумулятор №4, на плате сопряжения у отрицательного борна; T7 – аккумулятор №6, на высоте 115 мм от основания по узкой стороне аккумулятора; T8 – аккумулятор №8, на высоте 115 мм от основания по узкой стороне аккумулятора; T9 – на положительном силовом разъеме; T10 – охлаждаемая плита; T11 – на нижнем основании около аккумулятора №4).

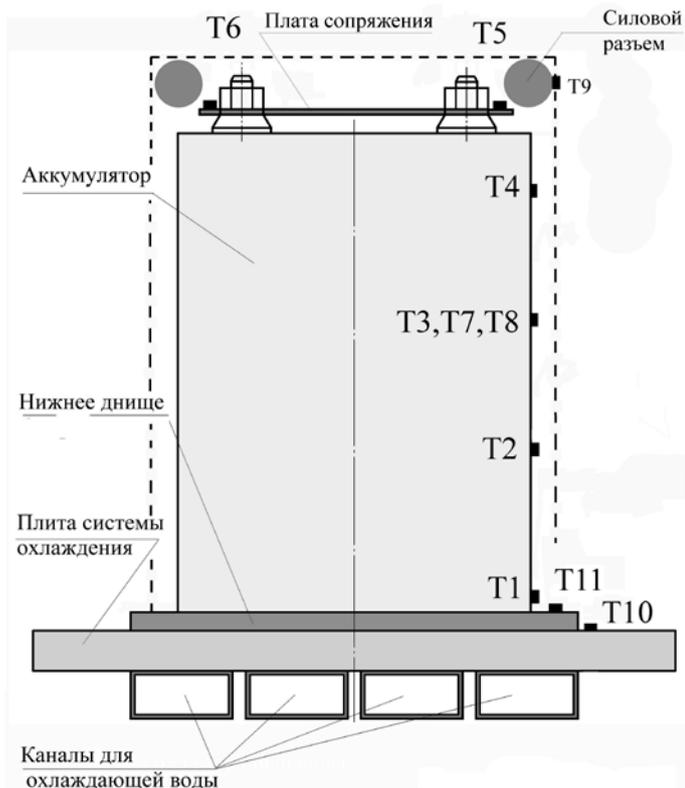


Рис. 2. Расположение внешних термодатчиков в батарее

Результаты экспериментов и их анализ

Для определения разрядной емкости и энергоемкости аккумуляторная батарея была предварительно разряжена при ступенчатом изменении тока 20 А, 10 А, 5 А до напряжения 2,8 В на каждом аккумуляторе на каждой из ступеней.

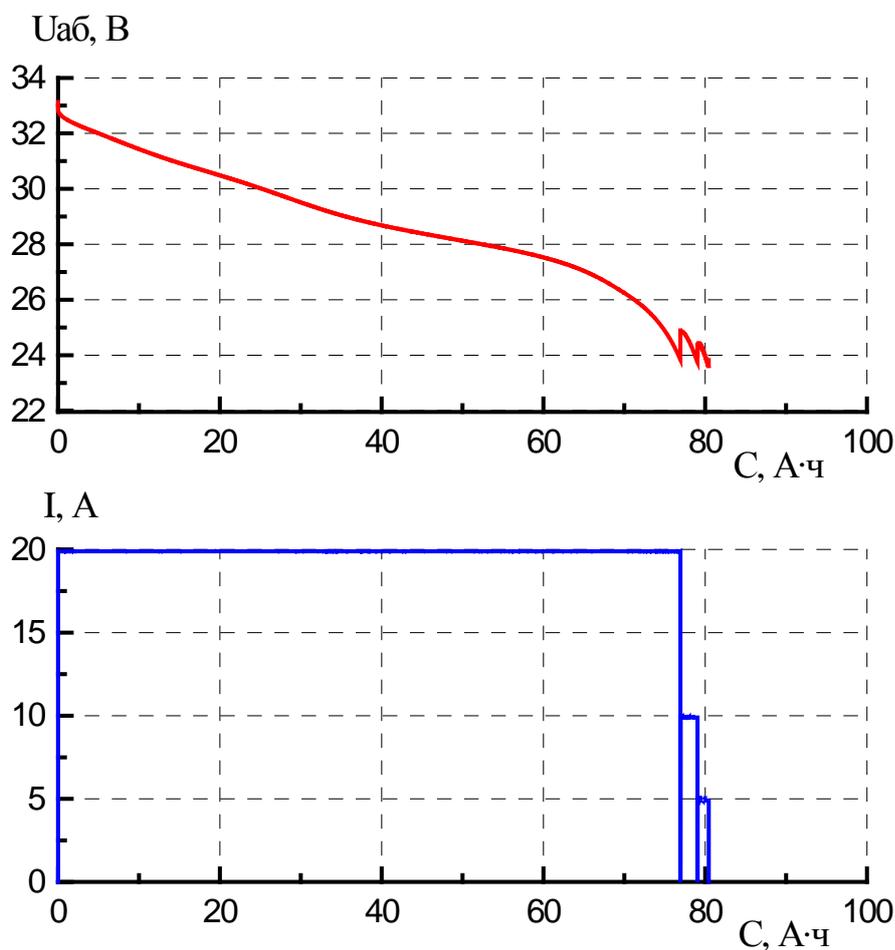
Заряд батареи осуществлялся ступенчатым током 20 А, 10 А, 5 А до напряжения на любом аккумуляторе 4,2 В на каждой из ступеней. После проведения режима заряда аккумуляторная батарея разряжалась, значения тока разряда

приведены в таблице 4.

Таблица 4

| Режим | Ток заряда, А | Ток разряда, А | Диапазон напряжения аккумуляторов, В |
|----------------------------------|---------------|----------------|--------------------------------------|
| Проверка емкости и энергоемкости | 20-10-5 | 20-10-5 | 2,8 – 4,2 |
| | 20-10-5 | 40-10-5 | 2,8 – 4,2 |
| | 20-10-5 | 60-10-5 | 2,8 – 4,2 |

На рисунке 3 приведен график изменения напряжения и тока на батарее при разряде ступенчатым током 20 А, 10 А, 5 А.



$U_{аб}$ – напряжение аккумуляторной батареи;

I – ток разряда;

C – фактическая разрядная емкость

Рис. 3. График изменения напряжения и тока на батарее при разряде

В таблицах 5-7 приведены значения емкости и энергии батареи при циклах полного заряда и разряда при разных токах разряда (T – температура батареи; I – ток заряда (разряда); ΔC – внесенная (отданная) батареей емкость на отдельном режиме заряда (разряда); C – полная внесенная (отданная) батареей емкость; ΔE – внесенная (отданная) батареей энергия на отдельном режиме заряда (разряда); E – полная внесенная (отданная) батареей энергия).

Таблица 5

| Параметр | Заряд ($T=22,3-19^{\circ}\text{C}$) | | | Разряд ($T=18-19,5^{\circ}\text{C}$) | | |
|------------------------------------|---------------------------------------|-------|-------|--|-------|-------|
| | 20 | 10 | 5 | 20 | 10 | 5 |
| I, A | 20 | 10 | 5 | 20 | 10 | 5 |
| $\Delta C, \text{A}\cdot\text{ч}$ | 78,01 | 1,98 | 1,03 | 76,94 | 2,1 | 1,40 |
| $C, \text{A}\cdot\text{ч}$ | 81,02 | | | 80,44 | | |
| $\Delta E, \text{Вт}\cdot\text{ч}$ | 2329,78 | 65,89 | 34,15 | 2228,24 | 51,31 | 33,69 |
| $E, \text{Вт}\cdot\text{ч}$ | 2429,82 | | | 2313,26 | | |

Таблица 6

| Параметр | Заряд ($T=22,4-18,1^{\circ}\text{C}$) | | | Разряд ($T=18,1-23,7^{\circ}\text{C}$) | | |
|------------------------------------|---|-------|-------|--|-------|-------|
| | 20 | 10 | 5 | 40 | 10 | 5 |
| I, A | 20 | 10 | 5 | 40 | 10 | 5 |
| $\Delta C, \text{A}\cdot\text{ч}$ | 78,45 | 1,96 | 1,03 | 76,42 | 3,78 | 0,89 |
| $C, \text{A}\cdot\text{ч}$ | 81,41 | | | 81,09 | | |
| $\Delta E, \text{Вт}\cdot\text{ч}$ | 2341,69 | 64,97 | 34,14 | 2190,67 | 93,84 | 21,12 |
| $E, \text{Вт}\cdot\text{ч}$ | 2440,80 | | | 2305,62 | | |

Таблица 7

| Параметр | Заряд ($T=21,8-18,1^{\circ}\text{C}$) | | | Разряд ($T=17,9-28,7^{\circ}\text{C}$) | | |
|------------------------------------|---|-------|-------|--|--------|-------|
| | 20 | 10 | 5 | 60 | 10 | 5 |
| I, A | 20 | 10 | 5 | 60 | 10 | 5 |
| $\Delta C, \text{A}\cdot\text{ч}$ | 78,92 | 1,93 | 1,04 | 76,56 | 4,37 | 0,58 |
| $C, \text{A}\cdot\text{ч}$ | 81,89 | | | 81,51 | | |
| $\Delta E, \text{Вт}\cdot\text{ч}$ | 2354,83 | 64,16 | 34,55 | 2179,84 | 104,06 | 13,59 |
| $E, \text{Вт}\cdot\text{ч}$ | 2453,53 | | | 2297,53 | | |

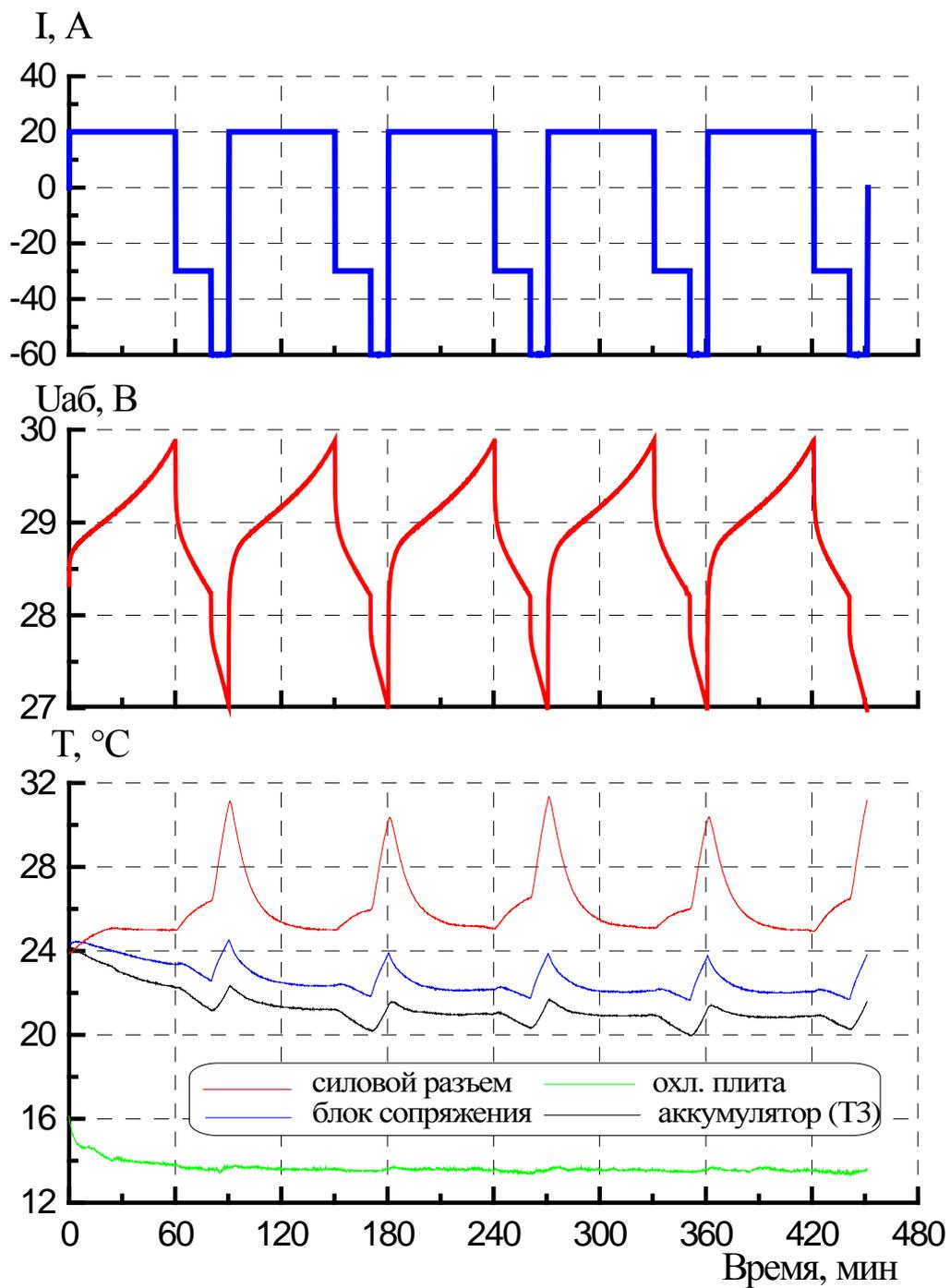
На основании данных таблиц 5-7 можно определить, что фактическая разрядная электрическая емкость на начало проведения испытаний составила ~ 81 А·ч; фактическая разрядная энергоемкость ~ 2300 Вт·ч; среднее значение КПД батареи по значениям внесенной и отданной энергии составляет ~ 0,96.

Перед проведением циклических испытаний батарея была предварительно разряжена при ступенчатом изменении тока 20 А, 10 А, 5 А до напряжения 2,8 В на каждом аккумуляторе на каждой ступени и затем заряжена током 20 А до 30 А·ч. Испытания проводились в нормальных климатических условиях.

Для режима работы батареи на низкой околоземной орбите проводились циклические испытания в режиме заряд-разряд, ток заряда 20 А в течение 60 мин., ток разряда 30 А в течение 20 мин. и 60 А в течение 10 мин. (режим максимального тока), с глубиной разряда 40% от заявленной номинальной емкости.

Для режима работы батареи на геостационарной орбите, глубина разряда была увеличена до 80% от заявленной номинальной емкости при токе заряда 20 А в течение 120 мин. и токе разряда 40 А в течение 60 мин.

На рисунках 4, 5 приведены графики изменения тока, напряжения батареи и температуры аккумуляторов при циклировании на соответствующих режимах.

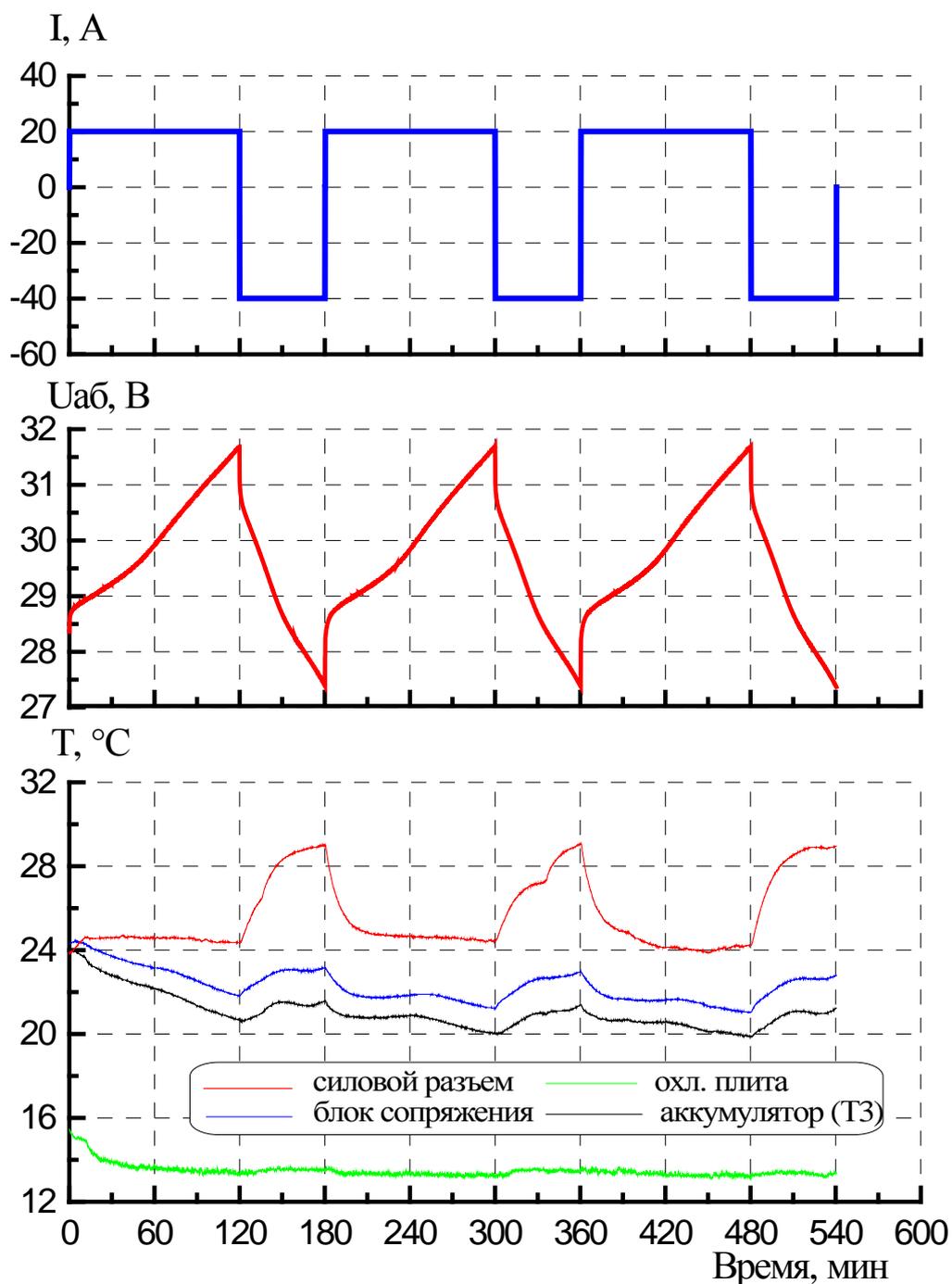


I – ток заряда (разряда) батареи;

$U_{аб}$ – напряжение батареи;

T – температура

Рис. 4. График изменения тока, напряжения батареи и температуры аккумулятора при циклировании в режиме НОО



I – ток заряда (разряда);

$U_{аб}$ – напряжение батареи;

T – температура

Рис. 5. График изменения тока, напряжения батареи и температуры аккумулятора при циклировании в режиме ГСО

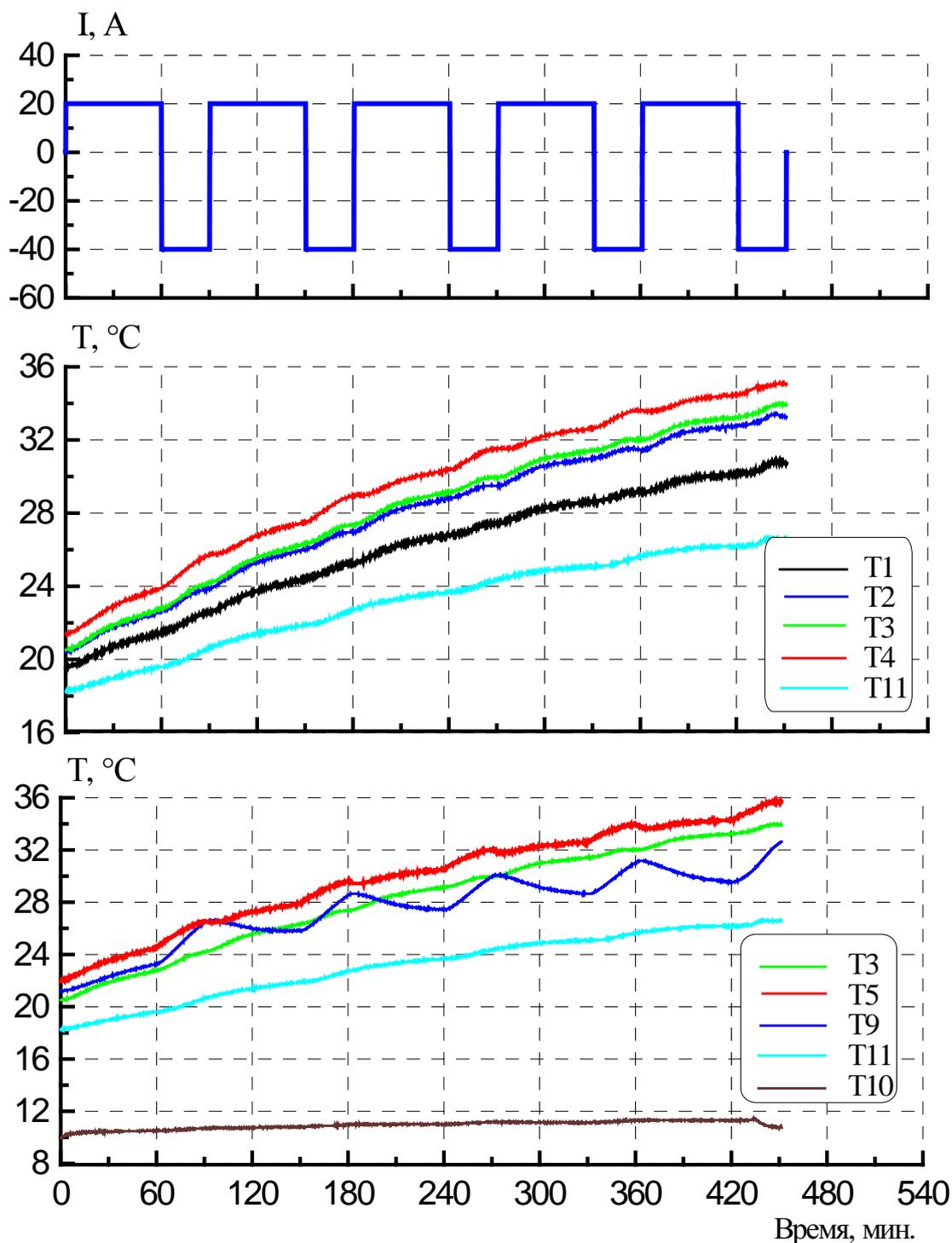
При проведении циклических испытаний аккумуляторной батареи в режиме НОО среднее значение внесенной энергии составило ~ 582 Вт·ч, отданной ~ 558 Вт·ч (энергетическая эффективность составила 0,96). При проведении

циклических испытаний в режиме ГСО среднее значение внесенной энергии составило ~ 1200 Вт·ч, отданной ~ 1154 Вт·ч (энергетическая эффективность составила 0,96).

Распределение температуры на поверхности аккумуляторов при циклировании в составе батареи на режимах, соответствующих работе на НОО и ГСО, при использовании системы охлаждения (температура поверхности плиты системы охлаждения $\sim 13,5^\circ\text{C}$) практически совпадает ($\sim 20\text{-}22^\circ\text{C}$).

На всех режимах испытаний отмечается повышенная температура силового разъема батареи. Так, на режиме заряда током 20 А температура силового разъема превышает максимальную температуру поверхности аккумуляторов на $4\text{-}6^\circ\text{C}$, а при разряде током 40 А превышение составляет $\sim 8^\circ\text{C}$. Максимальное значение температуры в батарее достигается на силовом разъеме при разряде максимальным током 60 А в течение 10 мин. и составляет $31\text{-}32^\circ\text{C}$.

На рисунке 6 приведен график изменения тока и температуры в различных точках аккумуляторной батареи при циклировании (ток заряда 20 А в течение 60 мин., ток разряда 40 А в течение 30 мин., глубина разряда 40% от номинальной емкости) в вакууме ($3 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.) с охлаждением.



T1-T11 – расположение термодатчиков в батарее в соответствии с рис. 2.

Рис. 6. График изменения тока и температуры в различных точках батареи при циклировании в вакууме ($3 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст.) с охлаждением

При проведении циклических испытаний в вакууме наблюдается повышение температуры аккумуляторной батареи, которая к концу пятого цикла при токе разряда 40 А возрастает до 32-34 $^{\circ}\text{C}$ и имеет тенденцию к незначительному

дальнейшему росту при продолжении циклирования.

Заключение

1. В результате выполнения данной работы была разработана конструкция литий-ионной аккумуляторной батареи, имеющая следующие характеристики: номинальная емкость – 50 А·ч, напряжение – от 32,8 до 22,4 В, удельная энергия – более 120 Вт·ч/кг, масса батареи – 19,6 кг.

2. Анализ экспериментальных данных, полученных в ходе проведения исследования электрических и тепловых характеристик литий-ионной аккумуляторной батареи при режимах работы, соответствующих работе батареи на ГСО и НОО показал, что:

- фактическая разрядная электрическая емкость на начало проведения испытаний составила ~ 81 А·ч; фактическая разрядная энергоемкость ~ 2300 Вт·ч; среднее значение КПД батареи по значениям внесенной и отданной энергии составляет ~ 0,96;

- при циклировании аккумуляторной батареи в нормальных климатических условиях максимальная температура поверхности не превышает 22°C при температуре поверхности плиты системы охлаждения ~ 13,5°C. Максимальное значение температуры достигается на силовом разъеме батареи и составляет 28-30°C при разряде током 40 А;

- при циклировании аккумуляторной батареи в вакууме температура возрастает до 32-34°C при токе разряда 40 А и наблюдается тенденция к незначительному дальнейшему росту при продолжении циклирования.

Библиографический список

1. Литий-ионная аккумуляторная батарея, патент РФ №127253 / Исследовательский центр имени М.В. Келдыша / Ребров С. Г., Янчур С. В., Мансуров В. С., Зернов О. Д. Заявка №2012151047/07 от 29.11.2012. Бюл. №11, 20.04.2013.
2. Дубасова В.С., Николенко А.Ф., Аботурова Н.В., Пешков А.Ф. Разработка литий-ионных аккумуляторов космического назначения. // Материалы девятой российской конференции "Физико-химические проблемы возобновляемой энергетики". - Санкт-Петербург, 2013. - 191 с.