

## Исследование теплового состояния аккумулятора в рабочем цикле

© Г.К. Клименко, А.А. Ляпин, М.К. Марахтанов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Приведены результаты исследования тепловых процессов при заряде и разряде элемента литий-ионной батареи, выполненного в целях прогнозирования его температурного состояния. Определены количество теплоты, отдаваемой элементом в окружающее пространство, температурный уровень и электрические характеристики элемента в рабочем процессе. Объектом экспериментального исследования стал литий-ионный аккумулятор емкостью 150 А·ч. Созданный для этих целей испытательный стенд позволяет проводить заряд элемента токами в диапазоне 20...75 А и разряд токами 30...150 А. Количество отведенной от аккумулятора теплоты определялось методом калориметрирования. Температура стенок аккумулятора при естественном охлаждении измерялась с помощью тепловизора в диапазоне температур 18...65 °С на разных режимах. Получены значения отводимой тепловой мощности, суммарного количества отведенной теплоты, внутреннего сопротивления аккумулятора в процессах заряда и разряда на разных токах и при различных начальных температурах процессов.*

**Ключевые слова:** литий-ионный аккумулятор, заряд, разряд, тепловая мощность, калориметрирование.

Одна из острейших проблем современной энергетики — накопление энергии. В связи с этим ведутся интенсивные работы по созданию новых химических накопителей, в частности, литий-ионных аккумуляторных батарей, обладающих рядом преимуществ [1].

В мощных силовых энергетических установках используют химические аккумуляторные батареи (АБ), состоящие из большого количества аккумуляторов. Их количество, электрическое соединение и компоновка в аккумуляторной батарее определяются емкостью батареи, ее напряжением и размещением в энергоустановке. В эксплуатации АБ реализуется рабочий цикл, включающий процессы заряда и разряда, при которых через элементы батареи протекают электрические токи, обычно достаточно большие, сопровождающиеся выделением теплоты в каждом элементе. Это приводит к нагреву и аккумуляторов, и батареи в целом. Кроме того, в рабочем цикле происходят химические процессы с выделением или поглощением энергии и соответствующим изменением температуры. Рабочая температура аккумулятора не должна превышать +50 °С при любых режимах работы АБ. Для определения допустимых температур при эксплуатации батареи необходимо знать количество теплоты, выделяющейся в аккумуляторе в процессах рабочего цикла АБ. Тепловое состояние

каждого аккумулятора также будет определяться его собственным тепловыделением и теплообменом с другими элементами батареи.

Целью работы стало исследование тепловых процессов при заряде и разряде элемента батареи для прогнозирования его температурного состояния. Для этого необходимо было определить количество теплоты, отдаваемой элементом в окружающее пространство, температурный уровень и электрические характеристики элемента в рабочем процессе.

Объектом исследования стал литий-ионный аккумулятор ЛИКГП-150 емкостью  $C = 150 \text{ А} \cdot \text{ч}$ . Размеры корпуса аккумулятора  $190 \times 130 \times 61,5 \text{ мм}$ , масса  $4,5 \text{ кг}$  [2].

В целях исследования характеристик аккумулятора создан стенд с зарядным и нагрузочным устройствами для реализации рабочего цикла, а также калориметр для контроля тепловых процессов. В качестве зарядного устройства использовался трехфазный нерегулируемый выпрямитель ВУ-600 и последовательно соединенные с ним балластные реостаты типа РБ-301. Нагрузочное устройство содержало три указанных балластных реостата, соединенные между собой параллельно и подключенные к элементу. Такая система позволяет проводить заряд аккумулятора токами в диапазоне  $20 \dots 75 \text{ А}$  и разряд токами  $30 \dots 150 \text{ А}$ . Напряжения уровня  $5 \text{ В}$  в ходе экспериментов измерялись приборами с ценой деления  $0,01 \text{ В}$ .

Калориметр выполнен в виде теплоизолированной емкости, в которую помещен аккумулятор с токоподводами, пропущенными через теплоизолированную крышку. Пространство между внутренними стенками калориметра и аккумулятора заполнено водой объемом около  $1 \text{ л}$ . Масса воды определялась взвешиванием с точностью до  $0,1 \text{ г}$ . Емкость для воды в калориметре выполнена из пластикового пакета с отражающим покрытием (масса пакета  $3 \text{ г}$ ), а корпус калориметра — из пенополистирола. В пространстве между стенками калориметра и аккумулятором на разной высоте размещены три ртутных термометра с ценой деления  $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ , сделано это для усреднения температуры воды в калориметре. В узком диапазоне измеряемых температур  $20 \dots 50 \text{ }^\circ\text{C}$  и напряжений  $2 \dots 5 \text{ В}$  используемые приборы обеспечивают приемлемую точность измерений.

Для измерения теплового потока, отводимого от аккумулятора в окружающую среду, аккумулятор помещен в калориметр, заполненный водой, воспринимающей выделяющуюся в процессе теплоту.

Уравнение баланса энергии представим в виде

$$Q_a = Q_b + Q_k,$$

где  $Q_a$  — теплота, отдаваемая аккумулятором, Дж;  $Q_b$  — теплота, воспринимаемая водой в калориметре;  $Q_k$  — теплота, воспринимаемая стенками калориметра.

Устройство калориметра позволяет пренебречь теплотой  $Q_k$  ввиду ее малости по сравнению с  $Q_b$ , поэтому принимаем

$$Q_a = Q_b = Q.$$

Теплоту  $Q$  можно представить в виде

$$Q = M_b c_b \Delta T_b,$$

где  $M_b$  — масса воды в калориметре, кг;  $c_b$  — теплоемкость воды  $4,176 \cdot 10^3$  Дж/(кг · К);  $\Delta T_b$  — подогрев воды в калориметре, °С.

Мощность теплового потока  $P$ , Вт, отдаваемого аккумулятором в калориметр, рассчитывается по формуле

$$P = \frac{M_b c_b \Delta T_b}{\Delta t},$$

где  $\Delta T_b / \Delta t$  — приращение температуры в интервале времени  $\Delta t$ .

Таким образом, для того чтобы вычислить мощность теплового потока, необходимо измерить температуру воды, время нагрева  $t$ , с, в процессах заряда и разряда аккумулятора, а также массу воды в калориметре  $M_b$ .

Указанная методика позволяет также определить теплоемкость аккумулятора, предварительно нагрев его и поместив в калориметр. При этом теплоемкость аккумулятора

$$c_a = \frac{M_b c_b \Delta T_b}{M_a \Delta T_a},$$

где  $M_a$  — масса аккумулятора, равная 4 500 г.

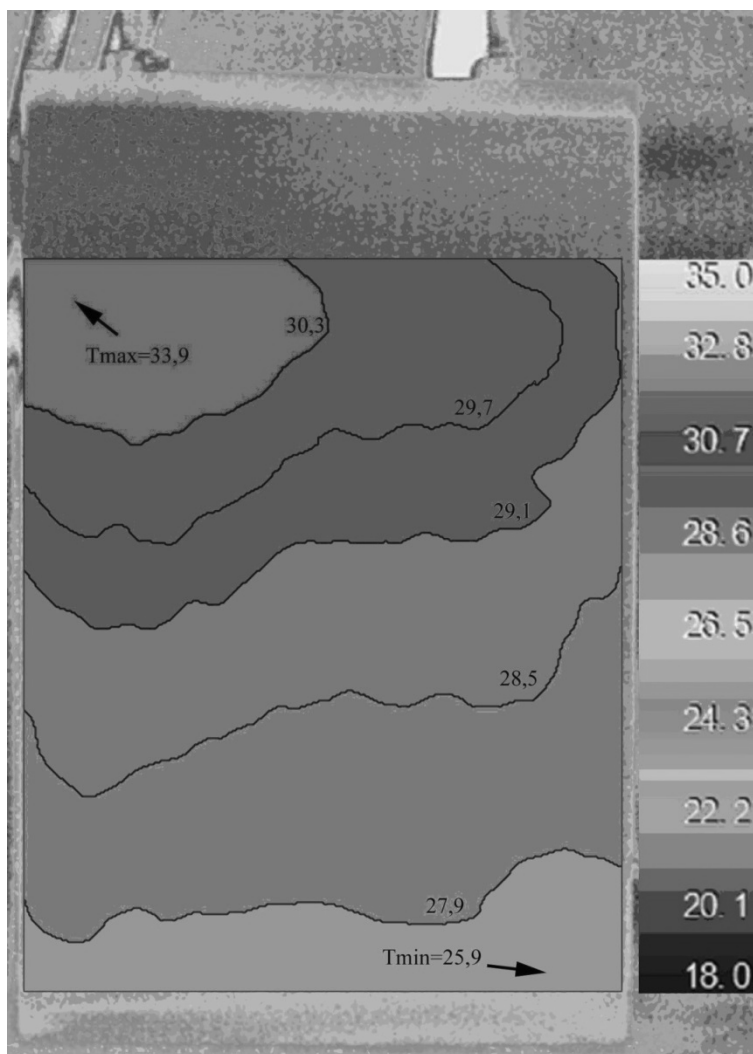
Проведено два измерения теплоемкости в диапазонах температур 30...50 и 20...30 °С, соответственно получены значения 458 и 747 Дж/(кг · К).

В процессах заряда и разряда измеряются напряжение на клеммах аккумулятора и сила тока, напряжение элемента при нулевом токе нагрузки, температура воды в калориметре  $T$  °С по всем термометрам и время  $t$ , мин. При расчете мощности теплового потока используется температура  $T_{cp}$ , усредненная по всем термометрам.

Испытания проведены на режимах 30 и 75 А по току заряда, а также на токах 30, 75 и 150 А при разряде аккумулятора.

Для того чтобы определить распределение температуры и оценить уровень нагрева аккумулятора, была измерена температура его поверхности. Для измерений использовался тепловизор SLIK типа SH 705 E с чувствительностью 0,1 °С. Перед экспериментом поверхность корпуса аккумулятора была зачернена. Измерения проводились на режимах 75 А в процессах заряда и разряда с интервалом 10 мин

(1/10 периода процесса). При каждом измерении фиксировалась картина распределения температуры, а также значение и местоположение максимальной и минимальной температуры. Типичное распределение представлено на рис. 1. На снимке видна фронтальная поверхность элемента, вверху слева расположена положительная клемма, вверху справа — отрицательная, на поверхности нанесены изотермы и значения температур ( $^{\circ}\text{C}$ ), справа рядом с элементом приведена шкала температур.

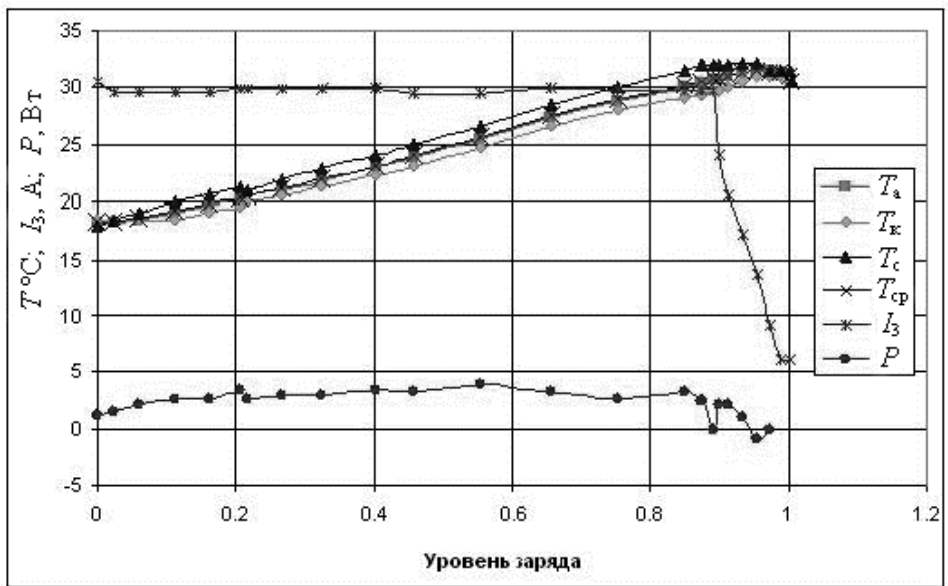


**Рис. 1.** Кадр тепловизора с нанесенными изотермами

Следует отметить заметную неравномерность распределения температур с максимумом в области положительной клеммы, с минимумом в нижней части корпуса под отрицательной клеммой и градиентом около  $8^{\circ}\text{C}$ .

При определении теплового потока калориметрированием нагрев воды в разных местах калориметра может быть различным, поэтому термометры были установлены в разных местах и на разных уровнях: в области анода —  $T_a$ , в области катода —  $T_k$  и в центре аккумулятора —  $T_c$ . В расчетах теплового потока использовалась среднеарифметическая температура  $T_{cp}$ .

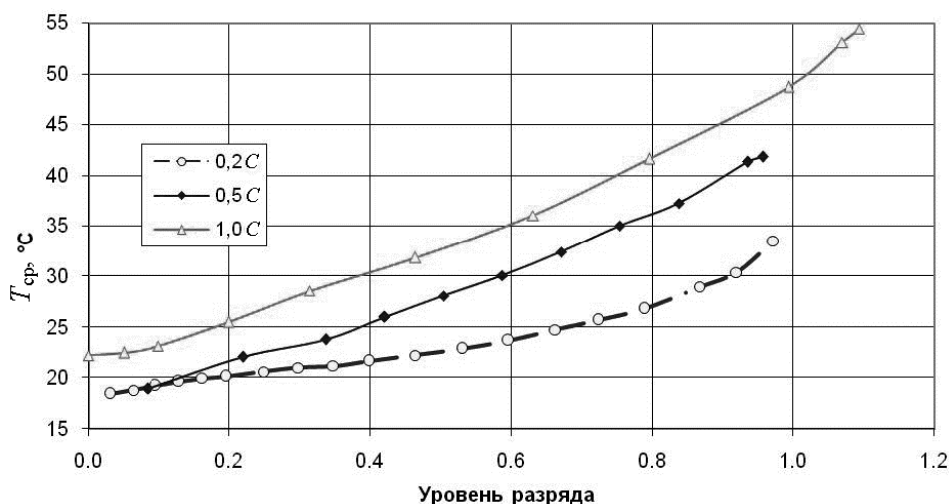
Начальная температура процесса, как правило, находилась в пределах 18...19 °С. Эти значения и будут подразумеваться по умолчанию в качестве начальных. На рис. 2 показано изменение всех температур, как измеренных, так и средней. Характер их изменения аналогичен, значения различаются не принципиально, поэтому в дальнейшем будем оперировать исключительно средней температурой  $T_{cp}$ .



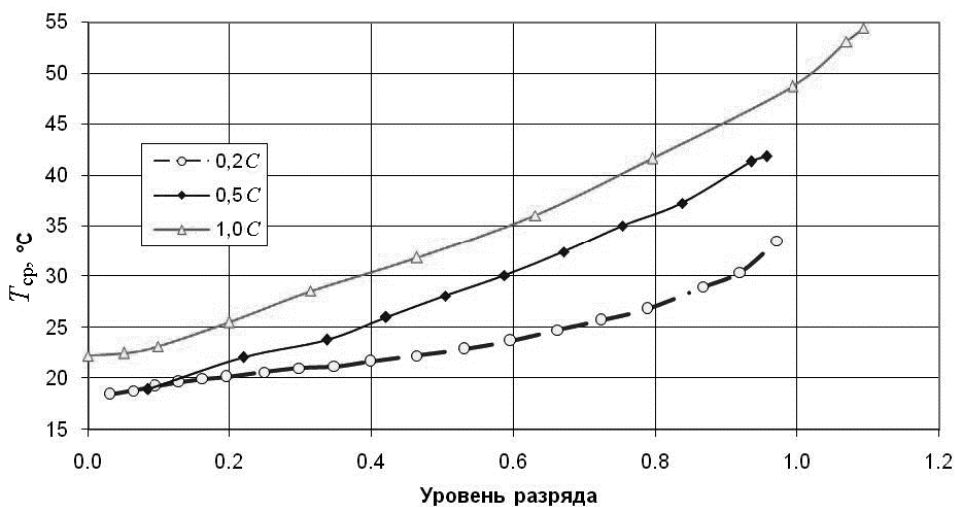
**Рис. 2.** Изменение температуры аккумулятора, тока заряда и мощности теплового потока, отдаваемого аккумулятором в калориметр в процессе заряда током 0,2С

Естественной циркуляции воды в калориметре недостаточно для быстрого выравнивания температуры по всему объему, поэтому в разных точках измерения температура различна (см. рис. 2), однако это различие существенно меньше, чем разница температур на поверхности корпуса аккумулятора, измеренная тепловизором (см. рис. 1).

На рис. 3 и 4 показано изменение температуры в процессах заряда и разряда аккумулятора различными токами. При низкой начальной температуре (18...19 °С) аккумулятор разогревается в любом случае.



**Рис. 3.** Изменение средней температуры в калориметре при разных токах разряда



**Рис. 4.** Изменение средней температуры при заряде разными токами для различных начальных температур

Для того чтобы оценить влияние начальной температуры на характеристики процессов, были проведены эксперименты на предварительно прогревом ( $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в калориметре элементе и на горячем ( $52\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) элементе сразу после окончания процесса разряда на максимальном токе  $1,0\text{C}$ .

Средняя температура  $T_{cp}$  и подогрев воды  $\Delta T$  в калориметре растут с изменением уровня заряда аккумулятора, как при заряде, так и при разряде (см. рис. 3–5).

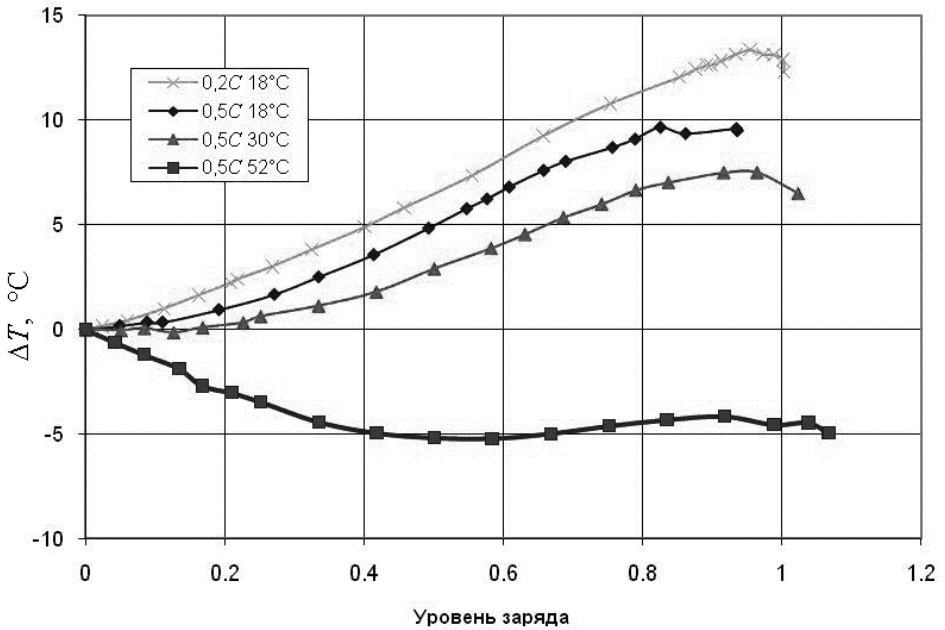
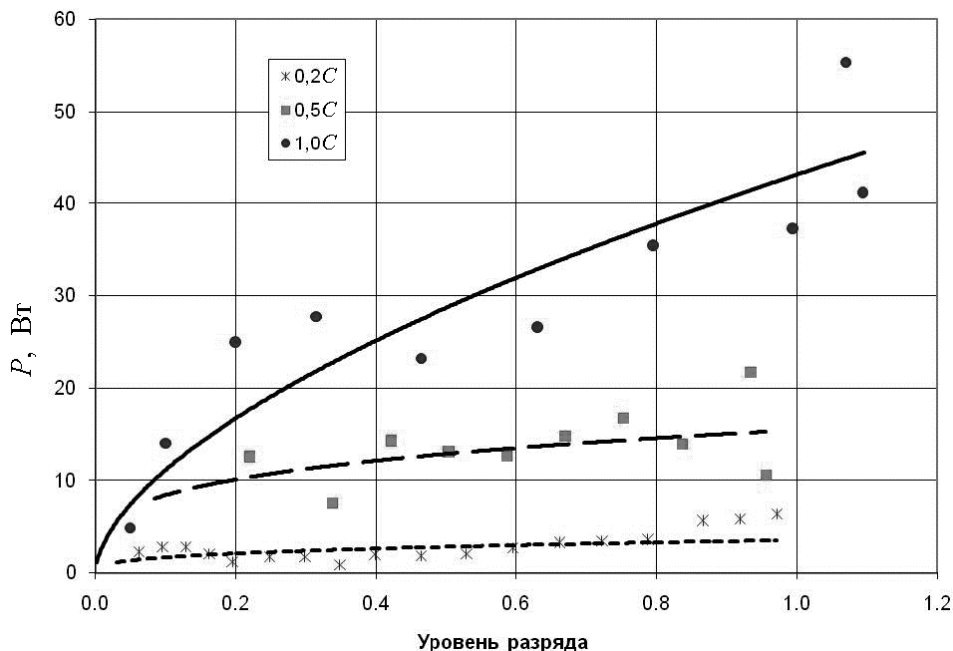


Рис. 5. Подогрев воды  $\Delta T$  в калориметре в процессе заряда при различных токах и начальных температурах аккумулятора

Наибольший подогрев наблюдается при меньшем токе, равном 0,2C (см. рис. 5). С ростом тока и повышением начальной температуры подогрев снижается. При высокой начальной температуре он вообще отсутствует в первой половине процесса (происходит охлаждение элемента), а затем наблюдается малозаметный подогрев в конце процесса заряда. Таким образом, основными факторами нагрева элемента в процессах заряда и разряда являются сила тока и начальная температура аккумулятора.

Зависимость мощности отдаваемого в калориметр теплового потока от времени показывает его монотонный рост при заряде и разряде за исключением начальных и конечных периодов процесса (рис. 6). Максимальное значение отдаваемого теплового потока определяется силой тока. В начале процесса заряда температура воды в калориметре понижается, т. е. происходит небольшое охлаждение аккумулятора, а затем наблюдается повышение температуры и теплового потока. В конце заряда, после выключения тока, температура воды продолжает некоторое время подниматься и плавно достигает максимума. В начале процесса разряда температура и тепловой поток повышаются монотонно, а в конце, после выключения тока, наблю-

дается их заметный скачок. Эти отклонения можно объяснить эндо- и экзотермическими эффектами реакций при поляризации электролита у электродов. Кроме того, отклонения могут быть связаны с изменением внутреннего сопротивления элемента, которое также было определено.



**Рис. 6.** Мощность теплового потока, отдаваемого аккумулятором в калориметр при различных токах разряда

Внутреннее сопротивление аккумулятора  $R_{\text{вн}}$ , вычисляемое как отношение напряжения на клеммах аккумулятора к току заряда или разряда, в обоих случаях — и при заряде, и при разряде — остается на одном уровне (небольшое снижение связано, вероятнее всего, с изменением температуры электролита) за исключением конечного периода процесса разряда, в котором наблюдается заметное повышение сопротивления (рис. 7), обусловленное, по-видимому, истощением энергии, запасенной в аккумуляторе при заряде. В то же время заметна зависимость внутреннего сопротивления от начальной температуры аккумулятора. Наименьшее внутреннее сопротивление было зарегистрировано в процессе заряда горячего блока (начальная температура  $52\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), оно составило  $2\text{ мОм}$  и практически не изменялось в течение всего процесса.

В конечном счете суммарное количество теплоты, отведенной от аккумулятора в процессе заряда и разряда при начальной температуре от  $18\text{ до }30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , с достаточной точностью можно представить в виде линейной функции от уровня заряда или разряда с параметром



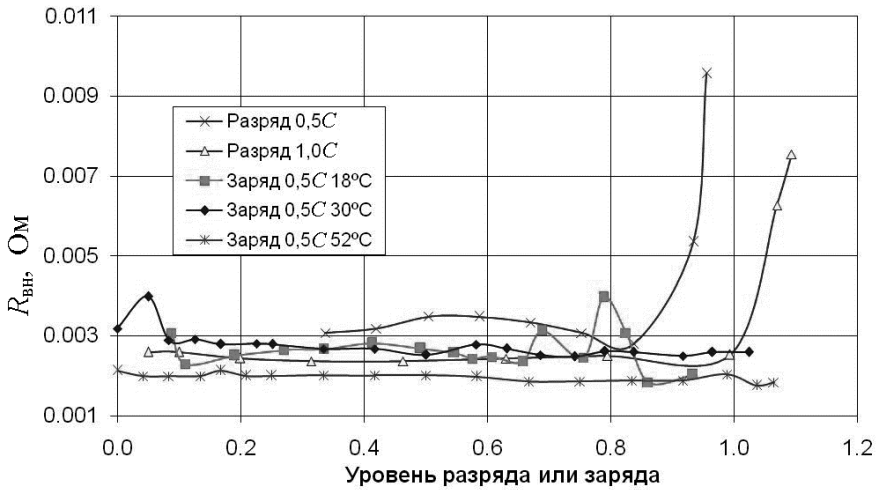


Рис. 7. Внутреннее сопротивление элемента на разных режимах

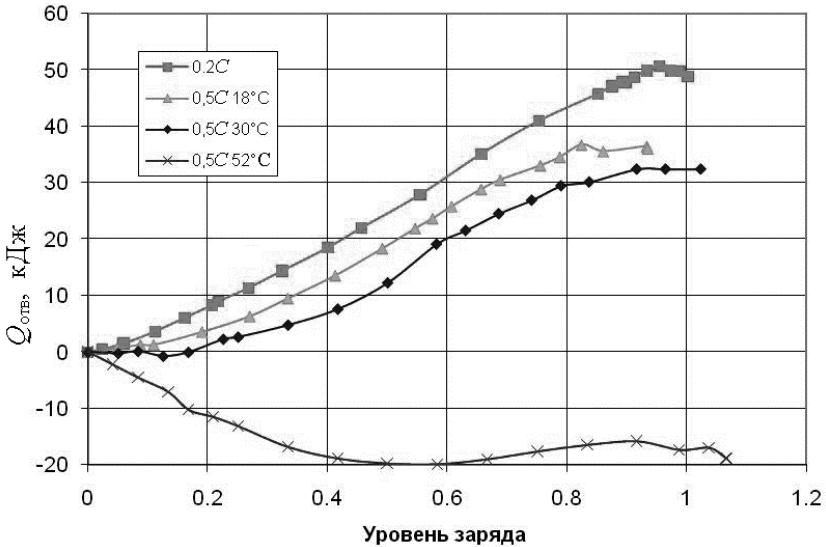
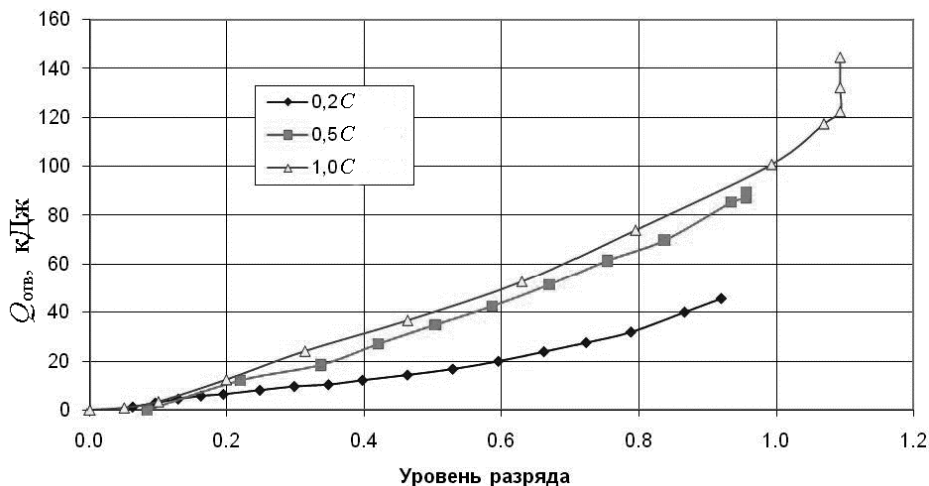


Рис. 8. Суммарное количество теплоты, отведенной от аккумулятора в процессе заряда

«величина тока», как это видно на рис. 8 и 9. В то же время при включении и выключении тока наблюдается отклонение от показателей регулярного процесса: снижение тепловыделения в начале заряда и повышение после выключения тока в конце разряда. Следует отметить, что при малых токах  $I_z = I_p = 0,2C = 30$  А, где  $C$  — численное значение емкости аккумулятора в А·ч, интегральное тепловыделение при заряде и разряде примерно одинаковое, а при больших токах (на уровне 0,5C) при разряде оно существенно выше (90 кДж), чем при заряде (35 кДж).



**Рис. 9.** Суммарное количество теплоты, отведенной от аккумулятора в процессе разряда

При заряде горячего блока тепловые потоки меняют свое направление — аккумулятор поглощает теплоту извне в течение всего цикла заряда (см. рис. 8).

Таким образом, можно сделать следующий вывод: выделение тепловой энергии при заряде-разряде аккумулятора — процесс многофакторный, он зависит от величины и направления токов, начальной температуры и исходного состояния заряда аккумулятора.

Проведенные испытания показали, что при прочих равных условиях рассматриваемый аккумулятор целесообразно эксплуатировать при повышенных температурах 35...45 °С, при которых обеспечивается снижение внутреннего сопротивления, уменьшение конечной температуры и сокращение тепловыделения в аккумуляторе.

Результаты проведенного исследования позволяют определить количество энергии, выделяемой элементом в рабочем процессе, и начать построение модели теплового состояния аккумуляторной батареи.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Быстров Ю.А., Кудрявцев Н.А., Краснобрыжий А.В., Логинова М.М., Жданов В.В. Разработка литий-ионных аккумуляторов и батарей с высокими удельными характеристиками для применения в морских объектах различного назначения. *Подводные исследования и робототехника*, 2007, № 2 (4), с. 34–37.
- [2] *Аккумуляторы и аккумуляторные батареи*. Санкт-Петербург, ОАО «Аккумуляторная компания «Ригель»», 2011. URL: [www.rigel.ru](http://www.rigel.ru)

Статья поступила в редакцию 19.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Клименко Г.К., Ляпин А.А., Марахтанов М.К. Исследование теплового состояния аккумулятора в рабочем цикле. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/plasma/1030.html>

**Клименко Георгий Константинович** родился в 1935 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1960 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 200 научных трудов и изобретений в области плазменных технологий, плазменных двигателей, устройств и систем. e-mail: [gkk@land.ru](mailto:gkk@land.ru)

**Ляпин Александр Александрович** родился в 1950 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 70 научных работ и изобретений в области плазменных технологий, плазменных двигателей и устройств. e-mail: [laa@power.bmstu.ru](mailto:laa@power.bmstu.ru).

**Марахтанов Михаил Константинович** родился в 1940 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1964 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 270 научных работ и изобретений в области плазменных технологий, плазменных двигателей и устройств. e-mail: [dim@power.bmstu.ru](mailto:dim@power.bmstu.ru).