

АНАЛИЗ И РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

СЛАБОСПИЦКИЙ Р.П., ХАЖМУРАДОВ М.А.,
ЛУКЬЯНОВА В.П.

Приводятся результаты анализа системы охлаждения аккумуляторной батареи, представляющей собой многоканальную систему. Предлагается математический аппарат, позволяющий в аналитическом виде описывать процессы, которые протекают в системе при различных геометрических характеристиках и скорости потока воздуха.

1. Введение

Для того чтобы аккумуляторная батарея нормально работала, ее температура должна поддерживаться в пределах $-30^{\circ}\text{C} \div +50^{\circ}\text{C}$. Такую температуру должна обеспечивать система охлаждения батареи. Кроме того, система охлаждения должна быть компактной, легкой, доступной по цене и способной работать в разных климатических условиях. Конструктивно батарея состоит из отдельных ячеек, число которых может быть значительным. Вся батарея охлаждается потоком воздуха или жидкостью.

В качестве примера рассмотрим параллельное охлаждение батареи воздухом. При параллельном охлаждении (рис. 1) поток воздуха подается снизу батареи, проходит по каналам между ее отдельными ячейками и выходит во внешнюю среду.

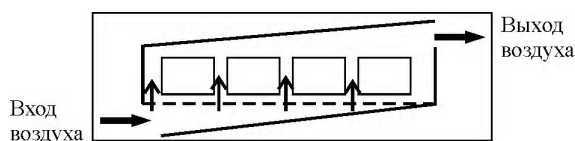


Рис. 1. Параллельное охлаждение батареи

Анализ работы системы охлаждения батареи выполняется в два этапа. Вначале производится анализ охлаждения отдельной ячейки обтекающим ее потоком воздуха при движении его по каналам, которые расположены между отдельными ячейками, а затем определяются условия охлаждения всей батареи.

Отметим, что анализ работы системы охлаждения батареи в большинстве исследований выполняют в основном с помощью двух методов: методом аналитических расчетов и методом численного моделирования. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки.

В данной работе используется метод аналитических расчетов, позволяющий в аналитическом виде описывать процессы, которые протекают в системе охлаждения батареи при различных размерах каналов и скорости потока воздуха.

2. Аналитический метод

Проведем анализ работы системы охлаждения батареи с помощью метода аналитических расчетов [1-3]. Этому методу большое внимание уделено в периодических изданиях (обзоры и статьи в журналах) [4-7].

Охлаждение поверхности каналов между ячейками батареи потоком протекающего воздуха определяется [1] уравнениями сохранения количества движения и энергии:

$$\begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \\ u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} &= \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь: u – местная скорость газа вдоль поверхности; v – удельный объем; T – температура; $\nu = \mu/\rho$ – коэффициент кинематической вязкости; μ – коэффициент динамической вязкости; ρ – плотность; α – коэффициент температуропроводности; $\nu/\alpha = (\mu/\rho)/(k/\rho C_p) = \text{Pr}$ – число Прандтля; k – коэффициент теплопроводности; C_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Решая систему уравнений (1), можно получить основное уравнение баланса энергии:

$$q_c = h_c \cdot A \left(T_s - \frac{T_{b1} + T_{b2}}{2} \right) = \dot{m} \cdot C_p (T_{b2} - T_{b1}) \quad (2)$$

и ряд других формул для расчета различных параметров.

В этом уравнении q_c – тепловой поток, поступающий в канал; A – общая площадь поверхности контакта газа с теплопередающей поверхностью; h_c – коэффициент теплопередачи; $\dot{m}$ – массовый расход газа; C_p – удельная теплоемкость; T_{b1} – температура потока на входе канала; T_{b2} – температура потока на выходе из канала; T_s – средняя температура стенки. В уравнении

(2) за счет введения члена $\frac{T_{b1} + T_{b2}}{2}$ учтена средне-массовая температура газа.

Для дальнейшего удобства анализа введем обозначения

$\Delta T_2 = \left(T_s - \frac{T_{b1} + T_{b2}}{2} \right)$, $\Delta T_1 = T_{b2} - T_{b1}$ и перепишем формулу (2) в виде

$$q_c = h_c \cdot A \cdot \Delta T_2 = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T_1. \quad (3)$$

Именно прямоугольный канал в настоящее время широко используется в батареях, поскольку ячейки изготавливаются в виде прямоугольных пластин.

В данной работе мы рассмотрим прямоугольный канал. Схема всей батареи изображена на рис. 2, где также приведены конкретные размеры ячеек, обдуваемых потоком воздуха.

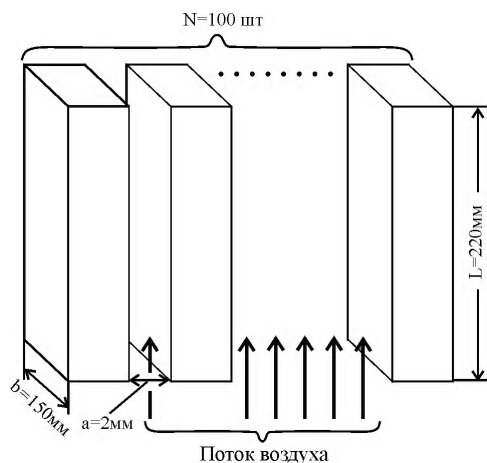


Рис. 2. Схема батареи с охлаждением воздухом через прямоугольный канал

Мы провели расчет системы охлаждения батареи, представленной на рис. 2, при скоростях воздушного потока, проходящего через каналы батареи 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20 м/с.

При скорости потока меньше 7 м/с воздух движется достаточно спокойно и не вызывает особого шума в системе охлаждения батареи, а при скорости потока воздуха больше 7 м/с шум в системе охлаждения будет заметным. Заметный шум связан с турбулентным движением воздуха.

В рассматриваемом нами случае в каждой ячейке выделяется 15 Вт мощности, т.е. $q_c = 15$ Вт. Поскольку тепло от ячейки выделяется через всю ее площадь, то площадь контакта с теплопередающей поверхностью будет $A = 2b \cdot L$, коэффициент кинематической вязкости $\nu = 17,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, плотность воздуха $\rho \approx 1,1 \text{ кг/м}^3$. Зададим температуру воздуха на входе в канал $T_{b1} = 20^\circ\text{C}$.

Вначале определим условия работы при скорости потока воздуха $V_m = 1 \text{ м/с}$.

Массовый расход воздуха через канал площадью $B (\text{м}^2)$ равен

$$\dot{m} = \rho \cdot B \cdot V_m, \quad (4)$$

где $B = a \cdot b = 2 \text{ мм} \cdot 150 \text{ мм} = 300 \text{ мм}^2$.

Следовательно, величина $\dot{m} = 0,328 \text{ г/с} \approx 0,32 \text{ л/с}$ через один канал и 32 л/с через 100 каналов батареи.

Движение воздуха по каналу может быть ламинарным или турбулентным, и в зависимости от типа движения необходимо использовать в дальнейших расчетах различные формулы. Для определения типа движения необходимо знать число Рейнольдса (Re). Сопротивление движению воздуха в канале при ламинарном движении намного меньше, чем при турбулентном. Граница перехода между ними определяется [2] критическим числом Рейнольдса $Re_{кр} \approx 2000$ ($Re < 2000$ – ламинарное, $Re > 2000$ – турбулентное движение).

Число Рейнольдса рассчитывается по формуле

$$Re = \frac{V_m \cdot D_h}{\nu}, \quad (5)$$

где V_m – средняя скорость движения воздуха; ν – коэффициент кинетической вязкости и D_h – гидравлический диаметр:

$$D_h = 4 \left(\frac{\text{площадь поперечного сечения потока}}{\text{смачиваемый периметр}} \right).$$

Для прямоугольного канала [1]

$$D_h = 2 \left(\frac{a \cdot b}{a + b} \right),$$

где a – ширина, b – высота канала.

Для рассматриваемого нами канала (при $a \ll b$) $D_h = 2a = 4 \text{ мм} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Следовательно, при $V_m = 1 \text{ м/с}$ величина $Re = 228$, что меньше критической ($Re_{кр} \approx 2000$), поэтому мы проведем расчеты для ламинарного движения воздуха по каналу.

Из формулы (3) легко определить ΔT_1 – изменение температуры потока между входом в канал и выходом из канала. Учитывая, что $C_p = 1014 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$,

$$\Delta T_1 = T_{b2} - T_{b1} = \frac{q_c}{\dot{m} \cdot C_p} = 45^\circ\text{C} \text{ и, следовательно, при}$$

$T_{b1} = 20^\circ\text{C}$ температура выходящего из канала воздуха будет 65°C .

Чтобы посчитать величину ΔT_2 и затем T_s – температуру поверхности ячейки по формуле (3), необходимо знать величину h_c – коэффициента теплопередачи, который рассчитывается по формуле

$$h_c = \frac{k \cdot Nu}{D_h}, \quad (6)$$

где Nu – число Нуссельта; $k = 0,0265 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$ – коэффициент теплопроводности воздуха.

Число Нуссельта вычисляется по разным формулам в зависимости от типа движения воздуха по каналу.

Для ламинарного движения [1]

$$Nu_{\text{лам}} = 1,86(Re \cdot Pr)^{0,33} \left(\frac{D}{L} \right)^{0,33} \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0,14}$$

Для $V_m = 1$ м/с величина $Nu_{\text{лам}} = 2,55$. В этих расчетах число Прандтля $Pr = 0,71$, коэффициент динамической вязкости $\mu_s = 18,2 \cdot 10^{-6}$ при $T = 20^\circ\text{C}$ и $\mu_s = 19,5 \cdot 10^{-6}$ при $T = 50^\circ\text{C}$.

Зная величины k , Nu и D_h , вычислим по формуле (6) h_c . Значение $h_c = 16,8$ Вт/м²·град. Используя это значение h_c , вычислим ΔT_2 и затем определим T_s – температуру поверхности:

$$\Delta T_2 = \frac{q_c}{h_c \cdot A} = 13,5^\circ\text{C},$$

$$T_s = \Delta T_2 + \frac{T_{b1} + T_{b2}}{2} = 13,5^\circ + \frac{20^\circ + 65^\circ}{2} = 56^\circ\text{C}.$$

Важно отметить, что температура поверхности ячейки, которая близка к температуре внутри ячейки, больше 50°C и, следовательно, необходимо принимать дополнительные меры по охлаждению поверхности ячейки.

Проведенные расчеты выполнены для случая, когда средняя температура стенки T_s была постоянной по всей высоте (L) ее поверхности. Но в реально работающих батареях это не так. Как видно из рис. 3 [4], в верхней части ячейки температура выше, чем в нижней.

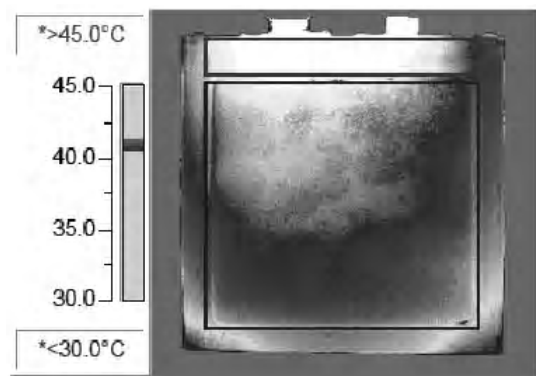


Рис. 3. Распределение температуры в аккумуляторной ячейке

Для более точного приближения к реальности рассмотрим случай, когда стенка условно разделена на четыре одинаковые части по 0,055 м высотой.

Из 15 Вт для всей батареи в самой нижней (первой) части ячейки пусть выделяется 2 Вт, во второй по высоте – 3 Вт, в третьей – 4 Вт и в верхней – 6 Вт (рис. 4).

Тогда для первой (нижней) ячейки

$$\Delta T_{21} = \frac{q_c}{h_c \cdot A} = \frac{2 \text{ Вт}}{16,8 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град} \cdot 2 \cdot 0,055 \text{ м} \cdot 0,15 \text{ м}} = 7,2^\circ\text{C}.$$

В расчетах температура протекающего через канал газа T_{b2} (при $T_{b1} = 20^\circ\text{C}$) делится по длине канала равномерно, т.е. на каждую из четырех частей температура возрастает на $45^\circ\text{C}/4 = 11,3^\circ\text{C}$. Следовательно, после первой части температура равна $31,3^\circ\text{C}$.

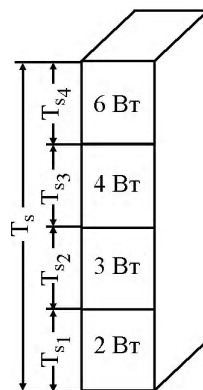


Рис. 4. Условное распределение мощности в аккумуляторной ячейке: величины T_{s1} , T_{s2} , T_{s3} , T_{s4} – соответственно температура поверхности первой (нижней) части ячейки, второй, третьей, четвертой (верхней) части ячейки; T_s – средняя температура всей поверхности без деления на части

В этом случае температура поверхности нижней (первой) части ячейки будет

$$T_{s1} = \Delta T_{21} + \frac{T_{b1} + T_{b2}}{2} = 7,2^\circ + \frac{20^\circ + 31,3^\circ}{2} = 33^\circ\text{C},$$

для второй части $T_{s2} = 47^\circ\text{C}$, третьей $T_{s3} = 62,6^\circ\text{C}$ и для четвертой $T_{s4} = 81,4^\circ\text{C}$.

Видно, что в случае, когда стенка разделена на четыре части, температура поверхности для самой верхней части возрастает почти на 30°C , а для нижней части падает на 30°C по сравнению со случаем, когда температура всей поверхности одинакова.

Следовательно, чем ближе к реальным условиям (т.е. для нашего случая, когда ячейка разделена на четыре части), тем яснее видно, что температура в ячейке намного превышает нормальные условия ее работы ($+50^\circ\text{C}$) и необходимы дополнительные меры по охлаждению ячейки.

Вследствие трения о стенки канала давление воздуха по его длине [2] падает на величину

$$\Delta p = 2f \cdot \rho \cdot V_m^2 \cdot \frac{L}{D_h},$$

где $f = 24 \cdot Re^{-1} \approx 0,1$, $\rho = 1,1$ кг/м³; V_m – скорость течения воздуха; $L = 0,22$ м – длина канала и $D_h = 4 \cdot 10^{-3}$ м. Поэтому для $V_m = 1$ м/с падение давления в канале $\Delta p = 12,1$ Па.

Проведя аналогичные расчеты для других значений скорости потока, получим следующие значения параметров.

При $V_m = 2$ м/с величина $Re = 456$ (движение воздуха ламинарное); $Nu = 3,2$; $\dot{m} = 0,66$ г/с; $h_c = 21,1$ Вт/м²·град; $\Delta T_1 = 22,5^\circ\text{C}$; $T_s = 43^\circ\text{C}$; $T_{s1} = 28,5^\circ\text{C}$; $T_{s2} = 37^\circ\text{C}$; $T_{s3} = 45^\circ\text{C}$ и $T_{s4} = 56,4^\circ\text{C}$. Падение давления в канале $\Delta p = 24$ Па.

Аналогичные расчеты были выполнены для скоростей потока воздуха $V_m = 3, 4, 5, 7$ м/с. Для всех этих скоростей потока воздуха движение ламинарное. Результаты расчетов приведены в сводной таблице.

Расчеты для скорости потока воздуха $V_m = 10$ м/с.

В этом случае число Рейнольдса $Re = 2280$ и движение потока воздуха будет турбулентным. Число Нуссельта, вычисленное [1] по формуле

$$Nu_{\text{турб}} = 0,023 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3},$$

будет равно $Nu_{\text{турб}} = 10$. Здесь, как и прежде, $Pr = 0,71$. Зная величины k , Nu и D_h , можно вычислить коэффициент теплопередачи h_c :

$$h_c = \frac{k \cdot Nu}{D_h} = 66,3 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град}.$$

Массовый расход воздуха через канал, т.е. $\dot{m} = 3,28$ г/см.

Величина $\Delta T_1 = \frac{q_c}{\dot{m} \cdot C_p}$ равна $4,5^\circ\text{C}$.

При температуре на входе в канал $T_{b1} = 20^\circ\text{C}$, температура газа на выходе равна $24,5^\circ\text{C}$.

Используя значение $h_c = 66,3$ Вт/м²·град, вычислим величину $\Delta T_2 = 3,4^\circ\text{C}$ и затем $T_s = 25,7^\circ\text{C}$ – среднюю температуру поверхности.

Разобьем, как и прежде, поверхность на 4 равные по высоте части (см. рис. 4).

Считаем, что в каждой части ячейки температура возрастает на $4,5^\circ\text{C}/4 = 1,13^\circ\text{C}$. Тогда для первой (нижней) части ячейки температура поверхности будет

$$T_{s1} = \frac{2 \text{ Вт}}{66,3 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град} \cdot 2 \cdot 0,15 \text{ м} \cdot 0,055 \text{ м}} + \frac{T_{b1} + T_{b2}}{2} = 1,8 + \frac{20 + 21,13}{2} = 22,4^\circ\text{C},$$

для второй $T_{s2} = 24,4^\circ\text{C}$, для третьей $T_{s3} = 26,4^\circ\text{C}$, для четвертой (верхней) части ячейки $T_{s4} = 31,2^\circ\text{C}$.

Видно, что при $V_m = 10$ м/с температура поверхности даже самой горячей (верхней) части ячейки не превышает требуемые граничные условия.

Падение давления в канале при скорости потока $V_m = 10$ м/с будет равно $\Delta p = 121$ Па.

Аналогичные расчеты выполнены для скорости потока воздуха $V_m = 15$ и 20 м/с.

Движение воздуха при этих скоростях будет турбулентным и данные расчета для этих скоростей приведены в таблице.

Следовательно, в сводной таблице приведены данные расчета системы охлаждения аккумуляторной батареи при всех рассмотренных нами скоростях потока воздуха, т.е. для $V_m = 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15$ и 20 м/с.

На рис. 5 для наглядности приведены изменение температуры потока между входом и выходом из канала (ΔT_1), средняя температура всей поверхности ячейки (T_s), температура поверхности четвертой (верхней) части ячейки при температуре входного потока 20 и 30 градусов (T_{s4} и T_{s4} 30 град.) в зависимости от скорости входного потока V_m .

Тип движения	V_m , м/с	Re	Nu	$\dot{m}$, (г/см)	h_c , Вт/м ² ·°C	ΔT_1 , °C	T_s , °C	T_{s1} , °C	T_{s2} , °C	T_{s3} , °C	T_{s4} , °C	Δp , Па
Ламинар.	1	228	2,55	0,33	16,8	45	56	33	47	62,6	81,4	12,1
Ламинар.	2	456	3,2	0,66	21,1	22,5	43	28,5	37	45	56,4	24
Ламинар.	3	682	3,66	0,99	24,1	15	36,9	27,5	34,7	42	51,2	38,2
Ламинар.	4	912	4,03	1,32	26,6	11,5	34,4	26,1	31,2	36,5	43	50,3
Ламинар.	5	1140	4,34	1,65	28,6	9	32,4	25,4	29,7	34	40,3	72,7
Ламинар.	7	1596	4,85	2,31	32,0	6,4	30	24,6	28,1	31,6	37	107,6
Турбулент.	10	2280	10,0	3,28	66,3	4,5	25,7	22,4	24,4	26,4	31,2	121
Турбулент.	15	3420	12,7	5,0	84,2	3,0	24,2	20,8	23,4	23,9	26,5	174
Турбулент.	20	4560	17,5	6,56	114	2,25	23,2	20,35	22,4	23,5	25,2	242

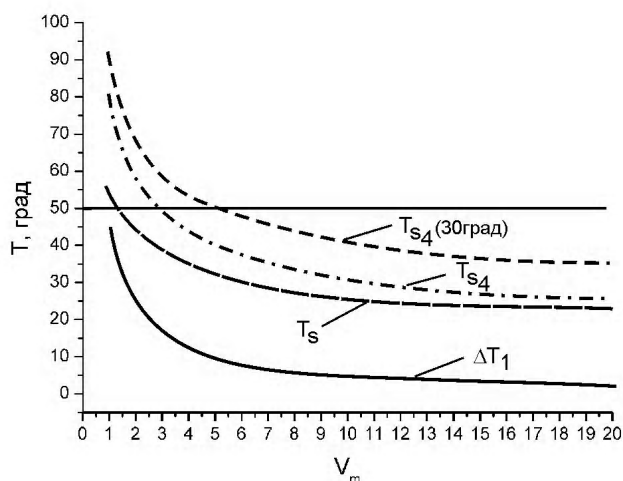


Рис. 5. Зависимость величин ΔT_1 , T_s , T_{s4} от скорости входного потока

Из приведенной таблицы и графика (см. рис. 5) видно, что при малых скоростях потока воздуха температура поверхности в верхней части батареи превышает 50°C , т.е. превышает предельно допустимый верхний предел работы батареи. И хотя движение потока воздуха при малых скоростях ламинарное и шум от работающей системы охлаждения не велик, работать батарея при таких температурах не сможет и необходимо искать новые технологические решения, чтобы и шум не очень увеличить, и температуру поверхности батареи снизить до допустимого предела.

Сравнивая температуру в верхней части батареи (T_{s4}) со средней температурой всей поверхности (T_s), видим, что особо опасна температура в верхней части батареи. Приведенная на графике (см. рис. 5) зависимость величины ΔT_1 от скорости потока воздуха позволяет определить температуру выходящего из батареи воздуха при разных температурах входящего в нее воздуха. Так, при скорости потока воздуха $V_m = 1 \text{ м/с}$ величина $\Delta T_1 = 45^\circ\text{C}$, т.е. если воздух входит в нее при 20°C , то выходит с температурой 65°C . А если воздух входит при 30°C , то выходит уже с температурой 75°C .

Для того чтобы было наглядно видно, для случая, когда в батарею входит поток воздуха с температурой 30°C , на рис. 5 приведена зависимость величины T_{s4} (30°C) от скорости потока воздуха. Отметим, что при температуре входного потока 30°C ситуация при малых скоростях становится еще более критичной в сравнении со случаем, когда температура входного потока воздуха равна 20°C .

На рис. 6 и 7 приведены соответственно зависимости коэффициента теплопередачи (h_c) и числа Нуссельта (Nu) от скорости входного потока воздуха от 1 до 20 м/с.



Рис. 6. Зависимость коэффициента теплопередачи h_c от скорости входного потока

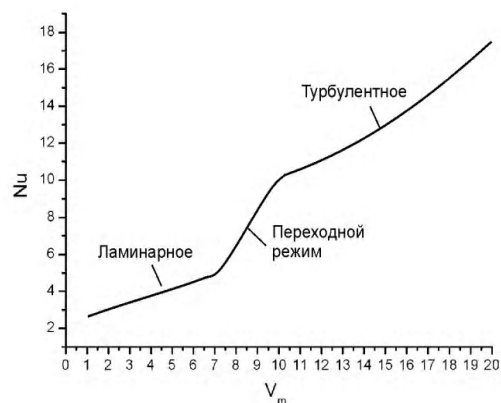


Рис. 7. Зависимость числа Нуссельта от скорости входного потока

Из графиков (см. рис. 6 и 7) зависимостей величины h_c – коэффициента теплопередачи и числа Нуссельта от V_m – скорости потока воздуха, а следовательно, и от Re – числа Рейнольдса видно, что при переходе от ламинарного движения к турбулентному, т.е. в районе $Re_{кр}$, наблюдается излом на кривых, что свидетельствует о переходном режиме в движении потока воздуха в зазоре между пластинами, и расчеты в районе $Re_{кр}$ надо делать с большой осторожностью.

3. Выводы

С помощью общих формул, приведенных в работах [1-3], представлен математический аппарат, который позволил, используя метод аналитических расчетов, проанализировать конкретную систему охлаждения аккумуляторной батареи для сложных технических систем. Проанализирована работа как отдельной ячейки, так и всей батареи, состоящей из 100 ячеек, изготовленных в виде прямоугольных пластин с зазором между ними 2 мм и тепловой мощностью, выделяемой в каждой ячейке, 15 Вт.

Показано, что при малых скоростях потока воздуха, поступающего в зазор между ячейками, охлаждение ячейки до температуры меньше $+50^\circ\text{C}$, а следовательно, и всей батареи невозможно. Это связано с малым значением коэффициента теплопередачи от поверхно-

сти к протекающему через канал воздуху, и необходимы специальные разработки, обеспечивающие требуемый режим системы охлаждения. Возможно, что в новых разработках будут использованы более современные технологии, не исключено даже нанотехнологии, поскольку, как показано в работе [8], нанесение на поверхность наночастиц оксида цинка увеличивает в четыре раза скорость отвода тепла во внешнюю среду.

Литература: 1. *Kreim Ф., Блэк У.* Основы теплопередачи. М.: Мир, 1983. 512с. 2. *Уонг Х.* Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. Справочник. М.: Атомиздат, 1979. 216с. 3. *Теплов А.В.* Основы гидравлики. М.-Л.: Энергия, 1965. 447с. 4. *Matthew A Keyser, Pesaran A. et all.* Thermal Characterization of Advanced Lithium-ion Polymer Cells // Third Advanced Automotive Battery Conference, June 2003. 5. *Pesaran A.* Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions. National Renewable Energy Laboratory. 1617 Cole Blvd. Golden, Colorado 80401 // Advanced Automotive Battery Conference, Las Vegas, Nevada, February 6-8, 2001. 6. *Kim Gi-Heon, Pesaran A.* Battery Thermal Management System. Design Modeling // EVS 22. October 23-28, 2006. Yokohama Japan. 7. *Pesaran A.* Battery Thermal Management in EVs and HEVs: Issues and Solutions // First Annual Advanced

Automotive Battery Conference Las Vegas, NV February 5-8, 2001. 8. *Hendricks T.J., Krishnan S. et all.* Enhancement of pool-boiling heat transfer using nanostructured surfaces on aluminum and cooper // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol.53, issues 15-16. P. 3357-3365.

Поступила в редколлегию 20.07.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Левыкин В.М.

Слабоспицкий Ростислав Павлович, д-р физ.-мат. наук, заместитель директора Института физики высоких энергий и ядерной физики (ИФВЭЯФ) Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-68-85, e-mail: slabospitskiy@kpt.kharkov.ua.

Хажмурадов Манап Ахмадович, д-р техн. наук, профессор, начальник отдела Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-68-46, e-mail: khazhm@kpt.kharkov.ua.

Лукьянова Валентина Петровна, ведущий инженер-программист Национального Научного Центра Харьковский Физико-технический институт (ННЦ ХФТИ). Адрес: Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, тел. (057)335-61-48. e-mail: khazhm@kpt.kharkov.ua.