

течения в смежной полости. Для полуоткрытого рабочего колеса  $K = 2$ , а при установке бандажа на периферии (для сравнительной оценки)  $K = 1, 2$ .

Высокая степень неравномерности параметров потока жидкости на выходе из РК и вихревая его структура в боковой полости высокооборотного насосного агрегата приводят к существенной потере энергии.

#### Библиографические ссылки

1. Краев М. В., Лукин В. А., Овсянников Б. В. Малорасходные насосы авиационных и космических систем. М.: Машиностроение, 1985.

2. Абрамович Г. Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960.

3. Хаген Р. Л., Данак А. М. Перенос импульса при турбулентном отрывном обтекании прямоугольной впадины // Тр. амер. о-ва инженеров-механиков. 1966. № 3. С. 189–195. (Серия «Прикладная механика»).

4. Левин А. А., Перельман Р. Г. Исследование цилиндрической гидромолоты // Исследование агрегатов, работающих на щелочных металлах: тр. МАИ. Вып. 193. М.: Машиностроение, 1969. С. 57–102.

5. Альбом течений жидкости и газа: пер. с англ. / сост. М. Ван-Дайк. М.: Мир, 1986.

6. Краев М. В., Овсянников Б. В., Шапиро А. С. Гидродинамические уплотнения высокооборотных валов. М.: Машиностроение. 1976.

Е. М. Краева, М. В. Краев

### INVESTIGATION OF VORTEX TURBULENT FLOW IN THE CENTRIFUGAL FORCE FIELD

*In the article we consider features of high-speed centrifugal pump flow with a semi-open impeller. Dependences for calculation of basic parameters of vortex turbulent flow in a centrifugal force field of semi-open impeller are obtained and presented.*

*Keywords: impeller, turbulence, vortex flow, diameter, width of a channel.*

© Краева Е. М., Краев М. В., 2010

УДК 681.5

М. Ю. Сахнов, А. Т. Лелеков, С. А. Галочкин

### РАСПРЕДЕЛЕННАЯ ЭНЕРГОТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ НИКЕЛЬ-ВОДОРОДНОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ 40НВ-70\*

*Рассмотрен способ построения динамической модели никель-водородной аккумуляторной батареи. Обсуждаются особенности моделирования, связанные с совместным использованием пакетов COMSOL Multiphysics и Simulink. Представлены результаты расчета типичного режима функционирования аккумуляторной батареи в составе космического аппарата.*

*Ключевые слова: моделирование, аккумуляторная батарея, никель-водородный аккумулятор, космический аппарат, теплопередача, объект с распределенными параметрами, COMSOL Multiphysics, Simulink.*

Для разработки, отладки и оптимизации элементов высокоэнергетических платформ космических информационных систем требуются адекватные и точные модели аккумуляторных батарей (АБ). Для повышения точности необходимо строить модель, учитывающую взаимозависимость энергетических и тепловых процессов батареи. Такие модели очень удобно строить с использованием взаимодействующих программных комплексов COMSOL Multiphysics-MATLAB-Simulink, в каждом из которых задана своя часть модели [1–3].

Используя методику, отработанную в [3], была построена модель никель-водородной (НВ) аккумуляторной батареи 40НВ-70 (рис. 1). Батареи этого типа применены на космическом аппарате (КА) «Sesat», изготовленном ОАО «ИСС» для корпорации «Alcatel Space», а также на российских КА серии «Экспресс-АМ». Батарея состоит из двух блоков, которые представляют собой плиту из магниевого сплава с 20-ю установленными аккумуляторами типа НВ-70. По длинным сторонам плиты с торца проведен контур жидкостного охлаждения.

\*Работы проведены при программной поддержке Научно-образовательного центра интегрированных компьютерных технологий Информационно-аналитического департамента Сибирского федерального университета.

**Описание модели.** За исходную точку разработок взяты модели из [4] – электротехническая модель и [5] – теплофизическая модель.

Достоинства модели [4]:

1) предварительная идентификация математической модели идеальной НВ АБ по реальному техническому состоянию эксплуатируемых батарей;

2) возможность моделировать ситуации разбаланса аккумуляторов по емкости, разгерметизацию, обрыв внутренней электрической цепи, возникновение линейных и нелинейных шунтов, рост фонового водорода;

3) успешно пройденная экспериментальная проверка со штатными образцами (квалификация) никель-водородных батарей (КА «Sesat», «Экспресс-АМ»).

К недостаткам следует отнести отсутствие тепловой модели АБ – учет разных тепловых условий работы аккумуляторов производится в процессе идентификация по данным летной эксплуатации. Однако модель позволила разработать методику устранения разбаланса, которая успешно внедрена на практике. Модель реализована на языке высокого уровня.

Теплофизическая модель [5] отличается наличием теплофизической составляющей – расчета поля температур батареи, таким образом, учитывается неодинаковость тепловых условий работы аккумуляторов. Также учтен нагрев теплоносителя системы терморегулирования. Электрическая составляющая модели подобна [4], но использованы уравнения идеализированных зарядно-разрядных кривых НВ аккумулятора. Модель реализована на языке высокого уровня, для расчета тепловых полей применен упрощенный метод конечных элементов.

**Особенности разработанной модели.** Вновь разработанная модель отличается следующими возможностями:

1) солвер, геометрия и параметры модели создаются с помощью специализированных САПР. Это позволяет быстрее и качественнее строить модели, становится про-

ще «отлов» ошибок, интеграция этапа отладки в сквозное проектирование АБ;

2) САПР Comsol и MATLAB работают совместно, используется возможности по решению задач в частных производных и имитационного моделирования САУ энергетикой АБ и процессов в смежных системах КА;

3) возможность решения задач оптимизации, как по параметрам модели (геометрия, теплофизические параметры материалов, способы теплоотвода), так и по внешним воздействиям (алгоритм управления, энергобалансные задачи).

Общая модель АБ 20НВ-40 состоит из двух взаимосвязанных моделей – электротехнической и теплофизической.

**Электротехническая модель.** В статье [4] приведено описание применяемой электротехнической модели, которая основана на моделях из работы [8]. Блок «Электротехническая модель» реализован в Simulink, в виде s-функции 2-го уровня.

Входы блока:

– средняя температура по ЭБ каждого аккумулятора (векторная переменная);

– ток АБ, так как аккумуляторы соединены последовательно, то их токи равны общему току АБ (скалярная переменная).

Начальные параметры блока:

– начальная запасенная емкость каждого аккумулятора [А·ч] (векторный параметр);

– вектор идентифицирующих параметров. Каждый аккумулятор идентифицируется десятью параметрами, определяющими его внутреннее сопротивление (зависимость напряжения от тока) и саморазряд.

Начальные параметры указываются в матрице, в которой каждая строка задает параметры каждого аккумулятора

$$M = [Cnom CO eds a b c d e f g h i j],$$

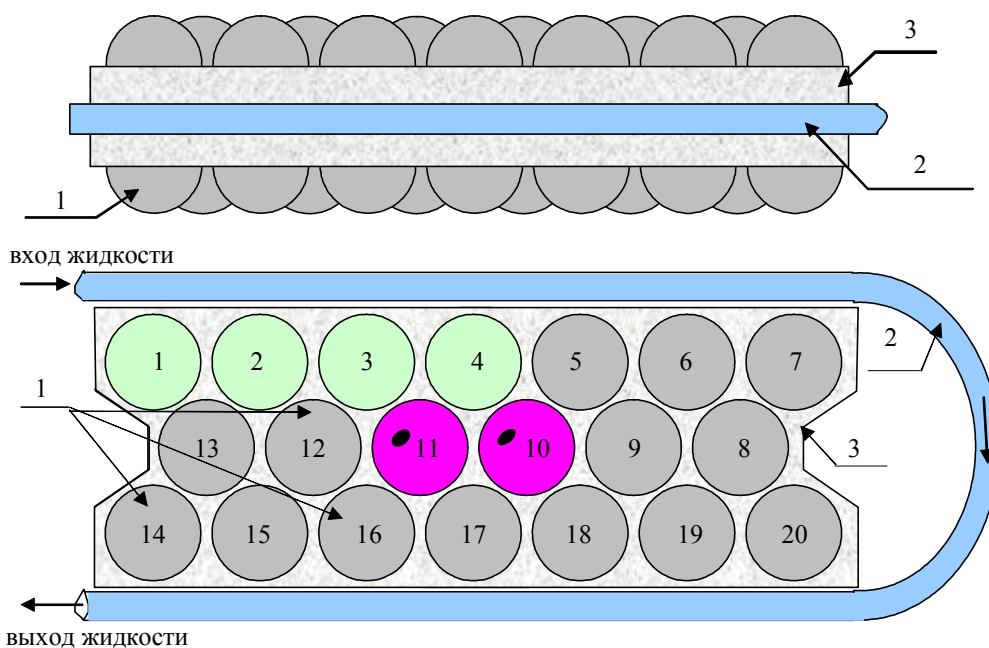


Рис. 1. Общий вид конструкции блока АБ 20НВ-70 и жидкостного контура охлаждения:

1 – аккумуляторы; 2 – жидкостной контур; 3 – плата

где  $C_{nom}$  – номинальная емкость (70 Ач);  $C_0$  – начальная емкость;  $eds$  – напряжение разомкнутой цепи;  $a-j$  – идентифицирующие коэффициенты.

Выходы блока:

- напряжения (векторная переменная);
- объемная мощность тепловыделения в ЭБ (векторная переменная);
- запасенная емкость (векторная переменная).

Электротехническая модель идеального никель-водородного аккумулятора состоит из следующих частей:

1. Уравнения кривых напряжения. Во всех режимах (заряд, разряд, хранение) применяются следующие выражения:

$$U_{ак}(C_{тек}, C_{max}, I_{ак}) = \varepsilon_{ак} + 0,12 \frac{C_{тек}}{C_{max}} - 0,195 \cdot \exp\left(-20 \frac{C_{тек}}{C_{max}}\right) + \partial U_{ак}(C_{max}, I_{ак});$$

$$\partial U_{ак}(C_{max}, I_{ак}) = \left( I_{ак} \frac{0,212}{C_{max}} - 0,0264 \left( \frac{I_{ак}}{83} \right)^2 \right) \frac{1 + 0,275 (I_{ак} - |I_{ак}|)}{I_{ак} + 0,0001},$$

где член  $\partial U_{ак}$  отражает зависимость напряжения от тока аккумулятора.

Эти выражения реализуются функцией:

$$\text{function } U_{ак} = U_{ак}(C_{тек}, I, M).$$

Расчет % напряжения аккумулятора:

$$U_{ак} = M(:,3) + 0,12 * (C_{тек}/83.) - 0,195 * \exp(-20 * C_{тек}/83.);$$

$$du = I * 0,212/83 - 0,0264 * (I/83.)^2;$$

$$U_{ак} = U_{ак} + du * (1 + 0,275 * (I - \text{abs}(I)) / (I + 0,0001)).$$

2. Уравнение напряжения аккумуляторной батареи – сумма напряжений аккумуляторов, соединенных в АБ последовательно.

3. Уравнения токов идеального аккумулятора. Классическое уравнение, описывающее изменение емкости аккумуляторов имеет вид

$$C_{тек} = C_0 + \int_0^t I_{АБ}(\tau) - I_{саморазр}(\tau) d\tau.$$

Данное уравнение реализуется стандартными средствами  $s$ -функций,  $C_{тек}$  задается как непрерывная переменная состояния, производная для которой рассчитывается как подынтегральное выражение вышеуказанной формулы.

4. Алгоритм расчета тока саморазряда идеального аккумулятора производится как функция текущей емкости. Входные данные алгоритма – текущая емкость  $C_{тек}$ , средняя температура ЭБ  $T_{ак}$ , ток  $I_{ак}$  и вектор идентифицирующих параметров  $[a \ b \ c \ d \ e \ f \ g \ h \ i \ j]$ . Порядок расчета для каждого аккумулятора следующий:

ЕСЛИ  $i > 0$  ТОГДА,

$K = i$ ;

ИНАЧЕ

$K = T$ ;

$Isr = d * C + f * \exp(g * (C - h) + c * K)$ ;

$KK = (a - b * K) * \exp(j * K)$ ;

ЕСЛИ  $KK > 1.1$  ТОГДА

$KK = 1.1$ ;

$Isr = Isr + \text{МОДУЛЬ}(I) * KK$ .

В MATLAB этот алгоритм реализуется следующей конструкцией:

```
function [Isr,K]=Isd(C, T, I, M) % расчет тока саморазряда, T в град. Цельсия
K=T.*ones(size(M,1),1);
N=find(M(:,12)>0);
K(N)=M(N,12);
Isr=(M(:,7).*C+M(:,9).*exp(M(:,10).*(C-M(:,11)))+M(:,6).*K);
KK=(M(:,4)-M(:,5).*K).*exp(M(:,13).*K);
KK(find(KK>1.1))=1.1;
Isr=Isr+abs(I).*KK.
```

5. Уравнение зависимости давления водорода внутри аккумулятора от емкости аккумулятора, по данным [6], представляет собой линейную функцию вида

$$P(C_{тек}) = \beta_1 \cdot C_{тек} + \beta_0.$$

6. Уравнение тепловыделения аккумулятора представляет собой кусочно-ломаную функцию:

– для  $Стек < 0,8 C_{ном}$ :

$$Q_{ак} = I_{ак} \cdot (U_{ак} - 1,5) + 1,5 \cdot I_{сразр};$$

– для  $Стек \geq 0,8 C_{ном}$ : эта часть выражения описывает тепловыделение при перезаряде. В момент перехода  $Стек = 0,8 C_{ном}$  тепловыделение запоминается в переменную  $Q80$  и используется для корректировки участка функции для перезаряда. Таким способом удается избежать скачка функции на этой границе:

$$Q_{80} = Q_{ак}(0,8 \cdot C_{ном});$$

$$Q_{ак} = Q_{80} + (20,615 - Q_{80}) \times$$

$$\times (1 - \exp(-0,0385 \cdot (0,8 + 0,14K))) (C_{тек} - 0,8C_{ном}).$$

В MATLAB этот алгоритм реализуется следующим образом: в переменную состояния  $Q80$  заносится мощность тепловыделения в блоке расчета состояния аккумуляторов, которая потом передается в основную функцию расчета мощности тепловыделения:

$N = \text{find}((Q80 = 0) \& (C_{тек} \geq (M(:,1) * 0,8 - 0,005)))$ ;

$Q80(N) = I * (U_{ак}(N) - 1,5) + 1,5 * Isr(N)$ ; % блок расчёта состояния

$\text{function } Q_{ак} = Q(C_{тек}, Q80, C_{ном}, Isr, K, I, U_{ак})$  % расчет тепловыделения

$Q_{ак} = I * (U_{ак} - 1,5) + 1,5 * Isr$ ;

$N = \text{find}(C_{тек} \geq C_{ном} * 0,8)$ ;

$Q_{ак}(N) = Q80(N) + (20,615 - Q80(N)) * \dots$

$(1 - \exp(-0,0385 * (0,8 + 0,14 * K(N)))) * (C_{тек}(N) - C_{ном}(N) * 0,8))$ .

**Теплофизическая модель.** Общий вид АБ, представленный на рис. 1, необходимо схематизировать. Детальная трехмерная модель АБ, построенная в COMSOL Multiphysics с использованием технологии связывания геометрий, дала адекватное реальному температурное поле (рис. 2).

Однако вычислительные требования трехмерной модели были высокими – количество степеней свободы сетки составляло около 740 тыс., соответственно затраты вре-

мени даже на расчет установившегося режима были высокими. Было произведено упрощение – трехмерная батарея была представлена двумерной. Эта возможность описана в [7]. Дополнительно было проведено следующее упрощение: два слоя (стенка аккумулятора и прокладка из герметика) были заменены на один, тепловые параметры ( $c, \rho, \lambda$ ) которого подобраны таким образом, что решение на двумерной модели стало таким же, как усредненное по  $z$ -координате трехмерное. Ошибка не превышала  $0,1\text{ }^\circ\text{C}$  (проверка проводилась для стационарного режима).

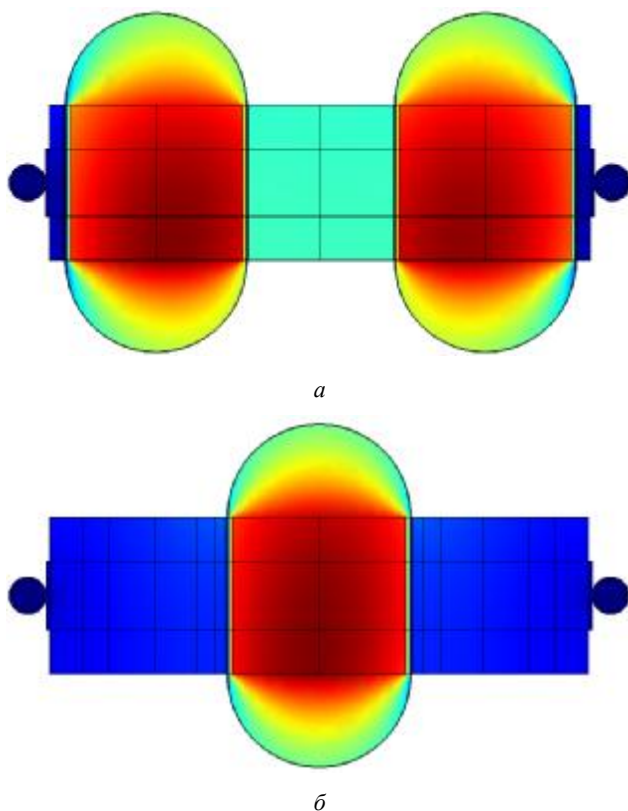


Рис. 2. Температурное поле трехмерной модели АБ: а – сечения по 3-му и 16-му аккумуляторам; б – сечения по 11-му аккумулятору

Контур охлаждения можно описать одномерным уравнением тепломассопереноса:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - c\rho V_{\text{жидк}} \frac{\partial T}{\partial x} + \alpha \frac{1}{d_{\text{конт}}} (T_{\text{пл}}(x) - T),$$

где  $c, \rho, \lambda$  – соответственно теплоемкость, плотность и теплопроводность теплоносителя;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $V_{\text{жидк}}$  – скорость движения теплоносителя;  $d_{\text{конт}}$  – эффективный диаметр контура охлаждения;  $T_{\text{пл}}$  – температура контура несущей плиты.

Коэффициенты уравнения описывают процессы накопления тепла в элементарном объеме ( $dx$ ), который складывается:

- из теплопередачи вдоль контура (вклад незначителен по сравнению со вторым слагаемым);
- притока и утока тепла под действием тока теплоносителя (производная – это разница теплопритоков на элементе  $dx$ );
- теплообмена с плитой.

Связь одномерной (контур охлаждения) и двумерной (батарея) геометрий осуществляется в COMSOL Multiphysics через инструмент Extrusion Coupling Variables.

В двумерной модели аккумуляторной батареи на охлаждаемых сторонах граничные условия задавались 3-го рода с коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$  и внешней температурой, равной температуре теплоносителя.

Одномерное уравнение контура охлаждения задается в COMSOL следующим образом. Общий вид дифференциального уравнения имеет вид  $\nabla \Gamma = F$ , для которого задаются следующие коэффициенты:

$$1) c = -\frac{\partial \Gamma}{\partial \nabla T} = -\frac{\partial(-k \cdot Tx)}{\partial Tx} \text{ – коэффициент диффузии, где } Tx = \nabla T \text{ (градиент температуры в терминах COMSOL);}$$

$$2) a = -\frac{\partial F}{\partial T} = -V_{\text{жидк}} \frac{\partial(c\rho \cdot Tx)}{\partial T} + \frac{\partial\left(\frac{\alpha}{d_{\text{конт}}}(T_{\text{пл}}(x) - T)\right)}{\partial T} \text{ – коэффициент поглощения (absorption coefficient);}$$

$$3) Y = \Gamma = -k \cdot Tx \text{ – conservative flux source term;}$$

$$4) \beta = -\frac{\partial F}{\partial \nabla T} = -V_{\text{жидк}} \frac{\partial(c\rho \cdot Tx)}{\partial Tx} + \frac{\partial\left(\frac{\alpha}{d_{\text{конт}}}(T_{\text{пл}}(x) - T)\right)}{\partial Tx} \text{ – коэффициент конвекции;}$$

$$5) \alpha = -\frac{\partial \Gamma}{\partial T} = -\frac{\partial(-k \cdot Tx)}{\partial T} \text{ – conservative flux convection coefficient;}$$

$$6) f = F = c\rho V_{\text{жидк}} \cdot Tx - \frac{\alpha}{d_{\text{конт}}}(T_{\text{пл}}(x) - T) \text{ – source term.}$$

В формулах константы  $c, \rho, \alpha, d_{\text{конт}}$  и т. п. стоят в производных в общем виде, чтобы учесть ситуацию, если они будут зависеть от температуры или координаты.

**Связь моделей.** Поскольку электротехническая часть модели требует в качестве входа среднюю температуру аккумулятора, то данные температурного поля дополнительно усреднялись по площади электродного блока (ЭБ). Однако применение стандартным образом полученной в COMSOL треугольной сетки влекло за собой необходимость расчета площадей треугольников и ввода весовых коэффициентов для каждой точки. Для упрощения расчета было построено поле равномерно распределенных по ЭБ точек, расположенных на концентрических окружностях, весовые коэффициенты которых были равными. Усреднение проводилось для каждого ЭБ по своей области (рис. 3).

Для расчета использовались процедуры решения линейных уравнений в частных производных (солвер) UMFPACK. Сетка построена стандартными средствами COMSOL. Сложность сетки была оптимизирована таким образом, чтобы обеспечить достаточную точность и детальность расчета температурного поля, а также приемлемую скорость вычислений.

**Теплофизические параметры модели.** При построении модели теплофизические параметры объектов были приняты следующими [4–6; 7; 8] (см. таблицу).

Параметры контура охлаждения следующие:

$$\alpha = 95 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}; d_{\text{конт}} = 0,016 \text{ м}; V_{\text{жидк}} = 0,6 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

**Общая модель.** Модель АБ была построена в Simulink по методике, описанной в [3]. Вид модели приведен на рис. 4. Электрическая и тепловая части модели замкнуты обратной связью по усредненной температуре аккумуляторов.

Блок «Методу» обеспечивает задержку информации о температурах аккумуляторов на один цикл обчета модели, для исключения неопределенности обратной связи типа «Algebraic Loop» [9].

**Результаты моделирования.** Решение в стационарном состоянии адекватно и соответствует реальному распределению температуры (рис. 5).

Ниже приведены графики напряжений аккумуляторов и батареи (начальная степень заряженности различна), температур аккумуляторов и температуры теплоносителя на выходе контура охлаждения. Результаты получены при следующих условиях.

Начальные условия – аккумуляторы заряжены, температура соответствует стационарному решению. В начальный момент устанавливается ток нагрузки, равный 20 А. Разряд проводится до достижения любым аккумулятором напряжения 1,15 В.

В модели также были использованы средства динамической визуализации (рис. 6, 7), описанные в [3].

Таким образом, использование специализированных САПР при разработке позволило создать достаточно гибкую в плане модифицируемости отдельных составляющих модель. Кроме того, в САПР используются отлаженные и оптимизи-

рованные под различные вычислительные архитектуры процедуры решения (солверы), предоставляются развитые средства для представления и анализа результатов, что позволяет исследователю сконцентрироваться на достижении поставленной цели, а не решать утилитарные задачи.

### Библиографические ссылки

1. Control of Systems Modeled by COMSOL Multiphysics as Distributed Parameter Systems / G. Hulko [et al.] // Proceedings of COMSOL Multiphysics User's Conference. Milan. Italy, 2009.
2. Van Schijndel A. W. M. Integrated modeling of dynamic heat, air and moisture processes in buildings and systems using SimuLink and COMSOL // Building Simulation : An International Journal. Vol. 2(2009), № 2.
3. Моделирование тепловых объектов с распределенными параметрами с использованием программных комплексов COMSOL Multiphysics-MATLAB-Simulink / А. Т. Лелеков [и др.] // Вестник СибГАУ. Вып. 4(30), 2010.
4. Сахнов М. Ю. Компьютерное моделирование никель-водородных аккумуляторных батарей (электротехническая модель) // Решетневские чтения : материалы VIII Всерос. научно-практ. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2004.
5. Шаркова Н. В. Математическая теплофизическая модель никель-водородных батарей // Решетневские чтения : материалы VIII Всерос. научно-практ. конф. ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2004.

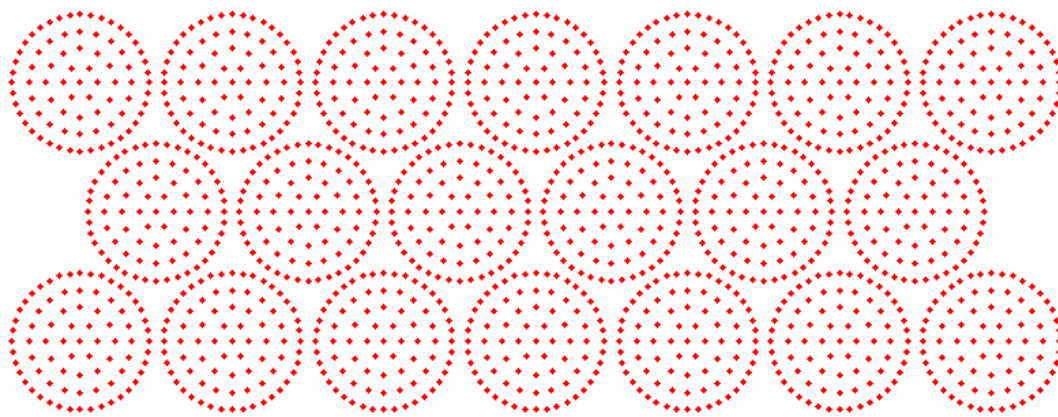


Рис. 3. Разбиение участков ЭБ

### Теплофизические параметры модели

	Теплопроводность $\lambda$ , $\left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right]$	Плотность $\rho$ , $\left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]$	Теплоемкость $c$ $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$	Тепловыделение для установившегося режима $Q$ , $\left[ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3} \right]$
Несущая плита (сплав МА2)	67,1	1 730	980	0
Герметик (УФ-7-21)	1	1 350	1 480	0
Стенка НВА (сплав Inconel 718)	12	8400	468	0
Водород	0,183 при $p = 1$ МПа 0,191 при $p = 100$ МПа	8,988e-2	14 330 при $p = 1$ МПа 14 540 при $p = 10$ МПа	0
Электродный блок	3,5 – радиальная 0,5 – осевая	1 876	1 296	18e3
Теплоноситель	400	710	1 183	0



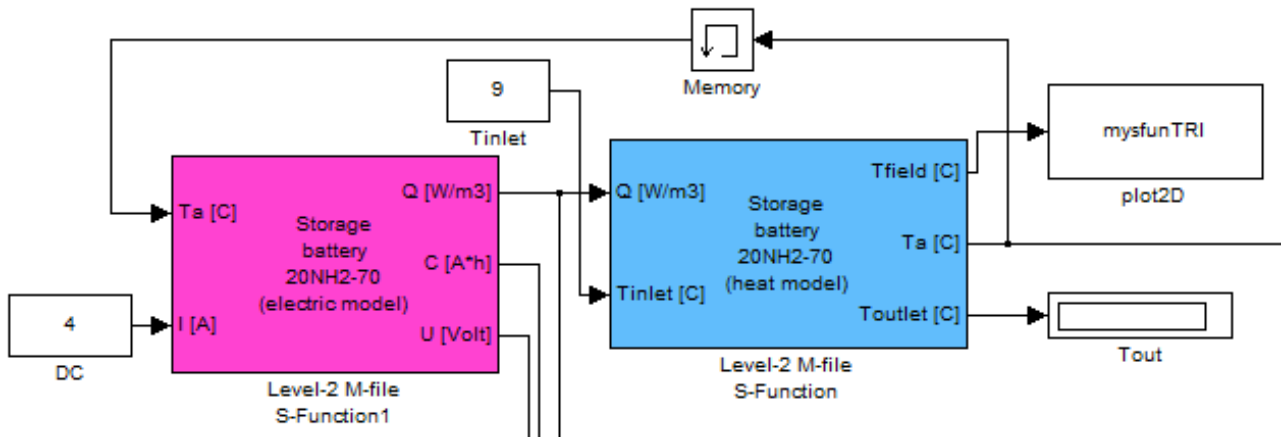


Рис. 4. Вид модели в Simulink

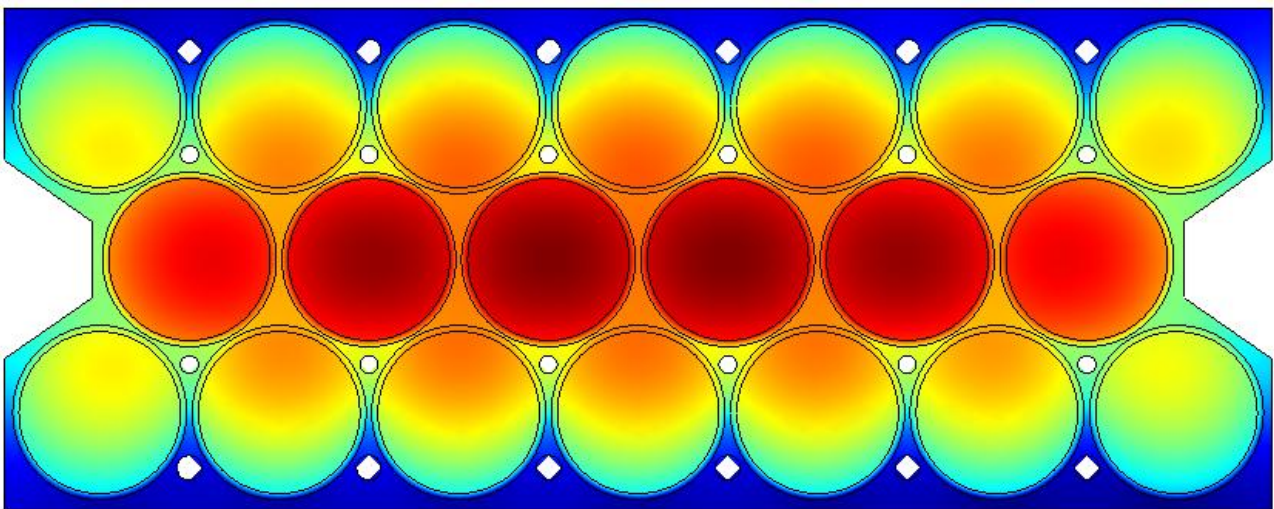


Рис. 5. Стационарное температурное поле

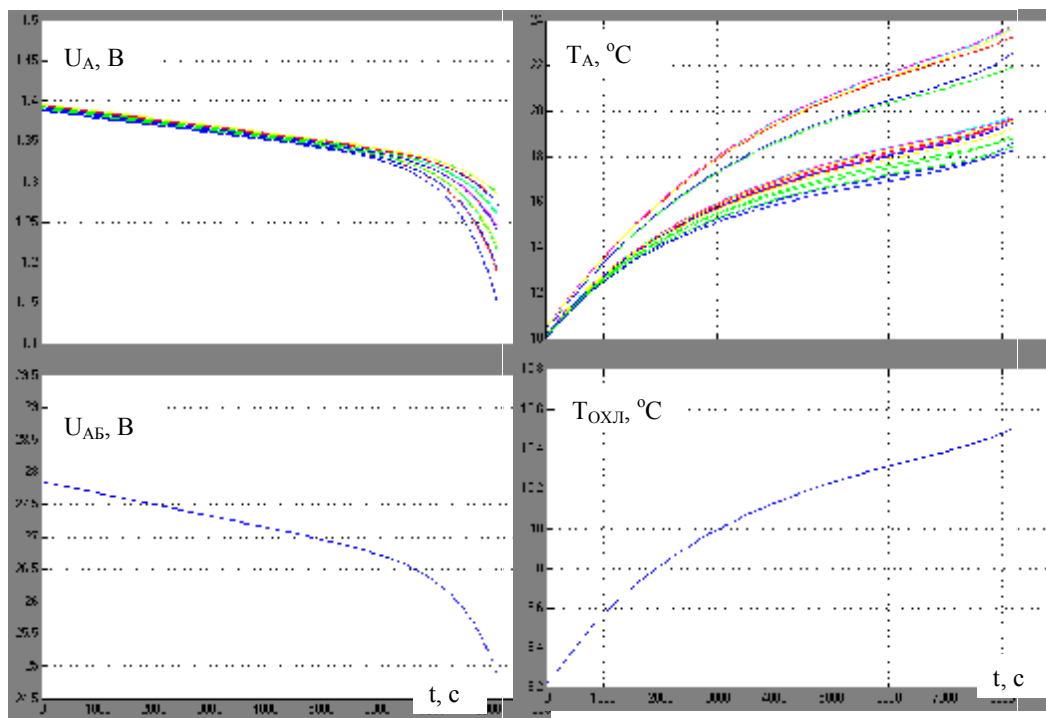


Рис. 6. Результаты моделирования: *a* – кривые напряжения аккумуляторов и общего напряжения батареи; *б* – кривые температур аккумуляторов и температуры теплоносителя на выходе контура охлаждения

6. Центер Б. И., Лызлов Н. Ю. Металл-водородные электрохимические системы. Теория и практика. Л.: Химия, 1989.

7. Лелеков А. Т. Управление энергетическим состоянием никель-водородных аккумуляторных батарей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : защ. 29.12.2005 : утв. 18.09.2006. Красноярск, 2005.

8. Физические величины : справ. / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Брагковский и др. ; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М. : Энергоатомиздат, 1991.

9. Simulink User's Guide. The MathWorks. Inc. 2009.

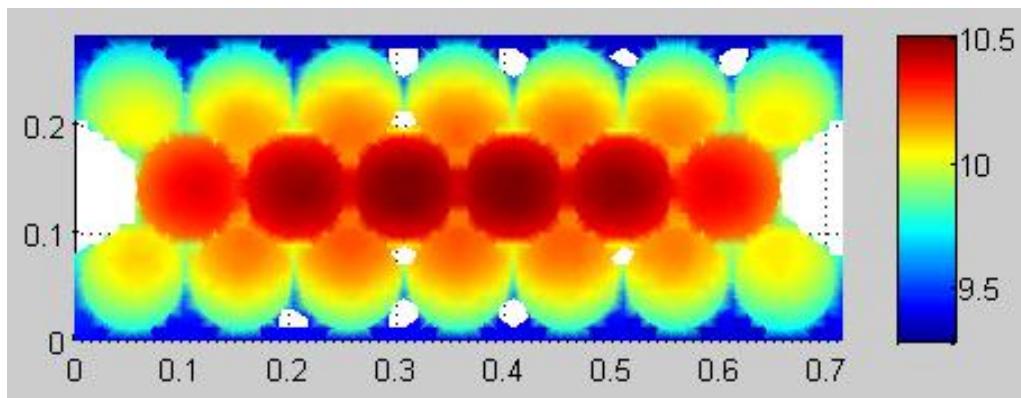


Рис. 7. Вид окна  $s$ -функции динамической визуализации

M. Y. Sahnov, A. T. Lelekov, S. A. Galochkin

### DISTRIBUTED PARAMETERS ENERGY-HEAT MODEL OF SPACE NICKEL-HYDROGEN STORAGE BATTERY

*Method of construction of dynamical models of Nickel-Hydrogen storage battery is described. Features of modeling connected with co-operative usage of COMSOL Multiphysics and Simulink packages are discussed. Results of calculation of the typical mode of operation of the battery, as a part of spacecraft design, are given.*

*Keywords: modeling, storage battery, nickel-hydrogen accumulator, spacecraft, heat transfer, distributed parameters objects, COMSOL Multiphysics, Simulink.*

© Сахнов М. Ю., Лелеков А. Т., Галочкин С. А., 2010

УДК 532

С. В. Алексеенко, Д. А. Дектерев, С. И. Шторк

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЦЕССИРУЮЩЕГО ВИХРЕВОГО ЯДРА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ\*

*Работа посвящена численному и экспериментальному исследованию нестационарных режимов течения в модельной вихревой камере с формированием прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ). Изучено влияние геометрических особенностей камеры на частотные характеристики ПВЯ и структуру вторичных вихрей, образующихся в выходной секции рабочего участка. Проведена оптимизация вихревой камеры для изучения ПВЯ в канонических условиях. Результаты данной работы создают основу для дальнейших исследований ПВЯ, которые будут направлены на проведение детальных измерений нестационарного поля течения с использованием современных оптических измерительных систем, таких как PIV и ЛДА.*

*Ключевые слова: вихревое ядро, прецессия, моделирование, частотные характеристики.*

Актуальность исследования процессов вихреобразования связана с широким использованием закрученных

потоков в технических приложениях. В промышленности используются скрубберы и циклонные сепараторы для

\*Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Федерального агентства по образованию и Федерального агентства по науке и инновациям.