

---

---

**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,  
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ**

---

---

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИММЕРСИОННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ  
ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
РАЗЛИЧНЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ**

© 2025 г. G. Ajay<sup>a</sup>, R. Krishna<sup>a</sup>, B. Mythirayan<sup>a</sup>, T. S. Vikram<sup>a</sup>, \*

<sup>a</sup>*School of Mechanical Engineering, SASTRA Deemed to be University, Thanjavur, 613401 India*

<sup>\*</sup>*e-mail: harivikram@mech.sastra.edu*

Поступила в редакцию 03.02.2024 г.

После доработки 11.04.2024 г.

Принята к публикации 25.04.2024 г.

Благодаря повышенной плотности энергии, длительному сроку службы, возможности быстрого заряда литий-ионные аккумуляторы (LIB – от англ. lithium-ion batteries) в последние несколько лет находят все более широкое применение в бытовых приборах, электромобилях, а также в энергетике, например для накопления энергии на ТЭС. С помощью аккумуляторов можно накапливать избыточную энергию, полученную от солнечных панелей и ветровых установок, для использования в период низкой ее выработки (ночью или в безветренные дни). Это повышает эффективность и стабильность возобновляемых источников энергии. Однако LIB чрезвычайно чувствительны к повышению температуры, поэтому ее необходимо постоянно контролировать, чтобы не допускать перегрева аккумуляторов. В данном исследовании проведен численный анализ иммерсионного охлаждения модуля, состоящего из 16 аккумуляторов (ячеек) LIB, расположенных в 4 ряда по 4 элемента в каждом ряду. Используются три различные охлаждающие жидкости: вода, минеральное масло и наножидкость, состоящая из воды и наночастиц  $Al_2O_3$ . Конструкции исследуемых модулей разработаны в SolidWorks, а тепловой анализ выполнен в ANSYS Fluent. Влияние эксплуатационных и геометрических параметров на тепловые характеристики модуля изучалось путем их варьирования. Результаты расчетов показали, что вода и наножидкость обладают лучшей охлаждающей способностью, чем минеральное масло. При высоких скоростях разряда (3C и 5C) при использовании воды и наножидкости средняя температура модуля повышается не более чем на 5°C. При увеличении расхода охлаждающей жидкости с 10 мл/мин до 1 л/мин средняя температура модуля снижается. При повышении температуры теплоносителя на входе модуля с 298 до 308 К из-за снижения коэффициента теплоотдачи температура поверхности ячеек возрастает. Исследование показало, что при высоком расходе охлаждающей жидкости и ее низкой температуре на входе модуля повышение температуры минимально даже при высокой скорости разряда (5C).

*Ключевые слова:* литий-ионный аккумулятор, система терморегулирования аккумулятора, иммерсионное охлаждение, скорость разряда C, охлаждающие жидкости

**DOI:** 10.56304/S0040363625700808

Литий-ионные аккумуляторы находят все более широкое применение в различных областях: от бытовой электроники до электромобилей (EV – от англ. electric vehicles), тепловых, солнечных и ветровых электростанций. Электромобили позволяют отказаться от ископаемого топлива и тем самым снизить загрязнение окружающей среды выхлопными газами. В последние годы LIB доминируют над другими аккумуляторами благодаря высокой плотности выдаваемой энергии, более длительному сроку службы и возможности быстрого заряда.

Литий-ионные аккумуляторы бывают цилиндрические, пакетные и призматические. Цилиндрические дешевле, имеют меньшие габариты и

безопаснее при эксплуатации, чем призматические. Литий-ионные аккумуляторы форм-фактора 18650 представляют собой цилиндры типоразмером 18 × 65 мм и являются наиболее широко используемыми перезаряжаемыми аккумуляторами. Их популярность резко возросла в автомобильной промышленности, портативной электронике и системах хранения энергии.

Один из важнейших компонентов современных электромобилей – система терморегулирования аккумуляторной батареи (BTMS – от англ. battery thermal management system), которая становится все более значимой для максимального увеличения срока службы батареи, повышения мощности, обеспечения безопасности и миними-

зации риска теплового разгона. Система ВТМ позволяет снизить температуру в аккумуляторной батарее, контролировать рабочую температуру и выравнивать температуру как внутри батареи, так и в отдельных ее ячейках. Аккумуляторы, как правило, выделяют тепло во время процессов заряда и разряда, поэтому для поддержания их эффективности и предотвращения повреждений очень важно управлять их тепловыми характеристиками. В ВТМС для рассеяния тепла используются различные методы охлаждения: воздушное и жидкостное, с применением материалов с фазовым переходом и т.д. Из всех доступных методов охлаждения прямое иммерсионное охлаждение, т.е. погружение батареи в теплоноситель, признано лучшей альтернативой традиционному, так как оно способно обеспечивать высокую однородность температуры как аккумуляторных батарей, так и отдельных аккумуляторов.

## ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

К настоящему времени проведено значительное количество исследований для выявления наилучшего метода охлаждения аккумуляторов, причем возросло внимание к их иммерсионному охлаждению, поскольку оно позволяет достичь более высокой эффективности охлаждения, чем традиционные методы, в широком диапазоне температур.

В [1] представлен обзор различных методов охлаждения, которые могут быть использованы для терморегулирования LiB в электромобилях: воздушное, охлаждение пластинами, прямое и косвенное жидкостное охлаждение, а также с использованием материалов с фазовым переходом. В [2] предложены перспективные конструкции систем терморегулирования для высоковольтных аккумуляторов, работающих в широком диапазоне температур. Авторы [3] провели оценку тепловых характеристик иммерсионного охлаждения батарейного модуля, состоящего из 21 700 цилиндрических LiB. Цель исследования заключалась в том, чтобы определить, возможно ли, применяя иммерсионное охлаждение, улучшить различные тепловые параметры аккумулятора, такие как температура ячейки, температурный градиент, изменение температуры между ячейками и падение давления внутри модуля.

В [4] проведено экспериментальное и численное исследование системы иммерсионного охлаждения с использованием воды для 20 цилиндрических аккумуляторов (расположенных последовательно и параллельно), причем батарея была погружена в теплоноситель только на 75%. Были изучены две различные конструкции батареи. Показано, что, если аккумуляторная батарея разряжается со скоростью 3С, то даже при небольшом расходе воды (200 мл/мин) можно га-

рантировать, что максимальная температура LiB не будет превышать 50°C. При большем расходе, например 1 л/мин, максимальная разница температур ячеек составляет не более 5°C.

Гидрофторэфиры являются одним из потенциальных кандидатов на роль охлаждающей жидкости при иммерсионном охлаждении LiB [5–9]. В [10] в качестве альтернативной жидкости для ВТМС рассматривалось масло. Минеральное масло и терминол применяли в качестве охлаждающей жидкости для аккумуляторной батареи, состоявшей из 20 литий-ионных аккумуляторов емкостью 10 А·ч. Были экспериментально исследованы и сопоставлены при разных скоростях разряда различные способы охлаждения: принудительное воздушное, охлаждение минеральным маслом и терминолом. Наиболее эффективным оказалось минеральное масло.

Авторы [11] провели численное моделирование иммерсионного охлаждения с использованием различных жидкостей, таких как деионизированная вода, минеральное масло и специально разработанная жидкость, для прямого охлаждения LiB, которая состояла из четырех последовательно и одного параллельно соединенных аккумуляторов. Был сделан вывод, что наиболее эффективно применение деионизированной воды при скорости разряда 3С, при этом обеспечивается ограничение повышения температуры не более чем на 2.2°C, а потребление энергии составляет всего 0.52 мВт.

В [12] проведено экспериментальное исследование системы терморегулирования батареи из модулей LiB пакетного типа. В качестве охладителей использовались различные наножидкости с частицами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CuO и AgO. Лучшие (по сравнению с чистой водой) показатели обеспечило применение наножидкости на основе AgO: максимальная температура батареи была снижена примерно на 4.1 К. Наножидкость представляла собой воду с концентрацией наночастиц AgO 2% (по объему).

Авторы [13] изучили сочетание таких структур, как змеевидные каналы и многослойные углеродные нанотрубки, для новой системы терморегулирования LiB с аккумуляторами 18650 при различных скоростях разряда.

В [14, 15] были разработаны численные модели для изучения влияния глубины разряда и температуры на жизненный цикл батареи, в [16, 17] – математические модели для исследования тяговой батареи электромобиля и запаса хода электромобиля при четырех различных нагрузках. В [18] были проведены эксперименты по изучению тепловых и электрических характеристик аккумуляторной батареи для оценки тепловыделения аккумуляторов Li-NMC, в состав материала анода которых входили никель, марганец и кобальт.

В настоящей работе проведено численное исследование прямого жидкостного охлаждения, в частности иммерсионного, для модулей трех конструкций, каждый из которых состоит из геометрически идентичных 16 цилиндрических литий-ионных аккумуляторов (ячеек) форм-фактора 18650, расположенных в 4 ряда по 4 ячейки в каждом. Изучено влияние на эффективность охлаждения таких параметров, как скорость разряда, температура охлаждающей жидкости на входе, объемный расход охлаждающей жидкости, при использовании различных охлаждающих жидкостей. В этой работе представлен анализ сегментированного иммерсионного охлаждения LІВ, которое дает лучшие результаты, нежели традиционное иммерсионное охлаждение.

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

#### *Проектирование и моделирование BTMS*

Рассматриваемая батарея состоит из 16 литий-ионных аккумуляторов 18650, заключенных в прямоугольный корпус из акрилового материала, имеющий внешние размеры 92 × 92 × 55 мм. На рис. 1, а показана базовая модель батареи, разработанная в SolidWorks, которая служит эталоном для сравнения с другими моделями. В корпусе базовой модели в нижней части модуля имеется одно отверстие диаметром 4 мм для входа теплоносителя, а в верхней части модуля на противоположной стороне по диагонали находится такое же отверстие для выхода теплоносителя. Расстояния между соседними ячейками составляют 4 мм, такое же расстояние — между ячейками и боковыми стенками. Предполагается, что весь модуль герметичен и, таким образом, утечки охлаждающей жидкости отсутствуют. Каждый аккумулятор погружен в акриловый материал на 85% своей высоты (65 мм), а верхняя и нижняя поверхности LІВ открыты для атмосферного воздуха. Такая компоновка модуля предотвращает протекание лю-

бых химических реакций между охлаждающей жидкостью и LІВ.

На рис. 1, б показан однопластинчатый модуль (модель 1), размеры которого такие же, как и у базовой модели. В середине модуля находится пластина толщиной 2 мм, изготовленная из акрилового материала. Эта пластина разделяет модуль на два отсека, каждый из которых имеет входное и выходное отверстия для теплоносителя, расположенных также диагонально на противоположных сторонах модуля.

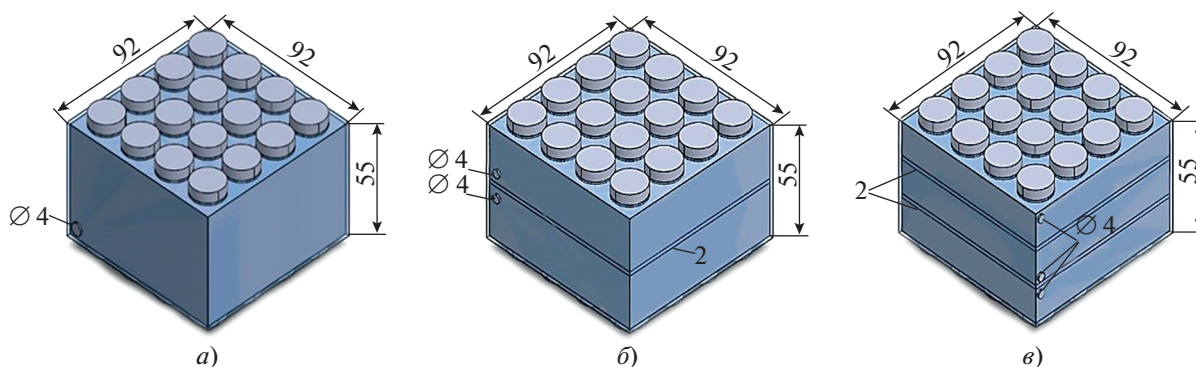
На рис. 1, в показан модуль (модель 2), включающий в себя две пластины толщиной 2 мм, изготовленные из акрилового материала. Пластины расположены в модуле таким образом, что они разделяют модуль на три равных отсека. Каждый отсек имеет входное и выходное отверстия диаметром 4 мм каждое, расположенных диагонально на противоположных сторонах модуля.

#### *Построение расчетной сетки*

Анализ BTMS выполнялся с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent. Сначала модель импортировалась из SolidWorks в ANSYS Fluent Workbench. Форма и размеры подготавливались в Design Modeler, где определялись и разделялись области жидкости и твердого тела. Затем в модуле Meshing Workbench строилась сеточная модель, причем для получения наиболее точных результатов и правильного построения сетки каждый элемент сетки имел размер 0.001875 мм. На рис. 2 показана сетка, созданная для базовой модели.

#### *Исследование независимости сетки и валидация численной модели*

Проведено исследование независимости сетки для выбора правильного размера ячеек без потери точности результатов. Рассматривались сетки с элементами четырех размеров в диапазоне от 0.007271 до 0.0018 мм. Было отмечено, что для элемента 0.001875 мм сетки с 419647 элементами



**Рис. 1.** Модели модулей, рассматриваемые в настоящей работе. а – базовая модель; б – модель 1; в – модель 2

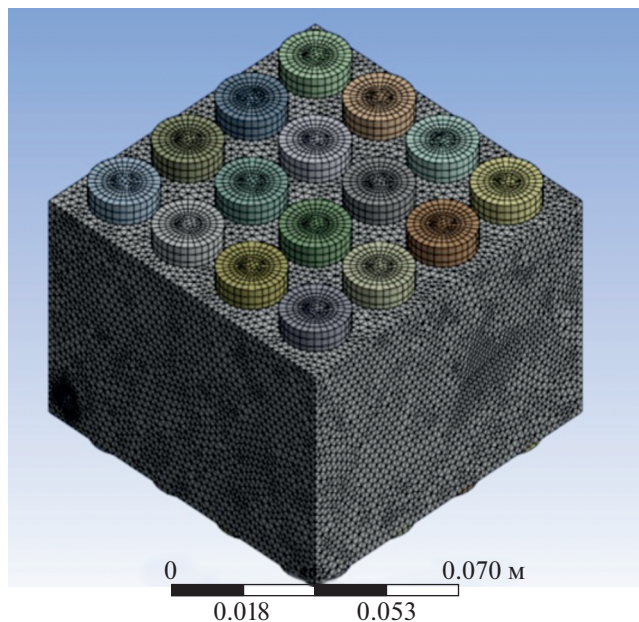


Рис. 2. Сетка, созданная для базовой модели

наблюдалось наименьшее изменение средней температуры модуля ( $T_{ave}$ ). Значения  $T_{ave}$ , определенные с помощью этой численной модели, сопоставлялись со средней температурой аккумуляторной батареи, которая охлаждалась водой, при скорости разряда 0.5С, полученной в [19]. Изменение средней температуры модуля во времени показано на рис. 3, и, как видно на этом рисунке, расхождение находится в пределах 6%.

## МЕТОДОЛОГИЯ

### Математическое моделирование

Уравнения сохранения массы, импульса и энергии для охлаждающей жидкости, проходящей через аккумуляторную батарею, имеют следующий вид [19]:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla(\rho \mathbf{V}) = -\nabla p + \mu \cdot \nabla^2 \mathbf{V}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla(\rho c_p T) = \nabla(\lambda \nabla T) + \dot{q}, \quad (3)$$

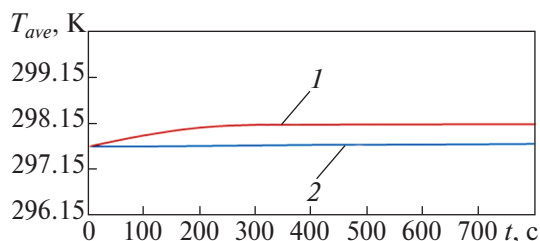


Рис. 3. Валидация численной модели.  
1 – настоящая работа; 2 – [19]

где  $\mathbf{V}$  – вектор скорости охлаждающей жидкости, м/с;  $t$  – время, с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $p$  – давление, Па;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, Па · с;  $c_p$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг · К);  $T$  – температура, К;  $\lambda$  – теплопроводность жидкости, Вт/(м · К);  $\dot{q}$  – объемное тепловыделение, Вт/м<sup>3</sup>.

Во время заряда и разряда в ЛИБ выделяется значительное количество тепла. За прошедшие годы было разработано несколько различных моделей для определения этой величины. В данном исследовании используется упрощенная формула для расчета тепловыделения в аккумуляторах, разработанная в [20]:

$$\dot{q} = \frac{1}{v} \left[ I^2 R_i + IT \frac{dU_0}{dT} \right], \quad (4)$$

где  $v$  – объем батареи, м<sup>3</sup>;  $I$  – сила тока, А;  $R_i$  – внутреннее сопротивление батареи, Ом;  $\frac{dU_0}{dT}$  – энтропийный коэффициент тепловыделения, В/К (его значение установлено равным 0.01116 В/К).

Были рассчитаны значения тепловыделения для скоростей разряда батареи 1С, 3С и 5С, которые составили 12 749, 106 412 и 280 189 Вт/м<sup>3</sup>, соответственно.

Скорость охлаждающей жидкости  $V$ , м/с, вычисляется из формулы для объемного расхода

$$Q = AV, \quad (5)$$

где  $Q$  – объемный расход охлаждающей жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $A$  – площадь сечения входного отверстия, через которое проходит теплоноситель, м<sup>2</sup>.

### Начальные и граничные условия

В настоящем разделе кратко описаны начальные и граничные условия, которые используются для расчета скорости и температуры для всех рассматриваемых далее случаев. Граничное условие для скорости на границе входного потока определяется на основе скоростей потока и площади поперечного сечения входного отверстия [формула (5)]. Температура охлаждающей жидкости на входе в модуль устанавливается для всех рассматриваемых случаев 298 К. Значения тепловыделения литий-ионных аккумуляторов при различных скоростях разряда рассчитываются в соответствии со скоростью разряда и далее используются при численном моделировании. Всего моделировался 81 случай с учетом изменения скоростей разряда, температуры на входе и объемных расходов для всех трех моделей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование проводилось с использованием различных охлаждающих жидкостей (вода, минеральное масло и наножидкость на основе  $Al_2O_3$ ), разных скоростей разряда (1С, 3С и 5С), скоростей потока (1.0, 2.0 и 3.0 л/мин), температур на входе (298, 303 и 308 К) для базовой модели и моделей 1 и 2. Для определения влияния одного из параметров два других параметра поддерживались постоянными. Сначала было проанализировано влияние охлаждающих жидкостей, расхода теплоносителя и его температуры на входе в базовую модель на среднюю температуру модели, затем были получены и сопоставлены результаты для базовой и двух сегментированных моделей.

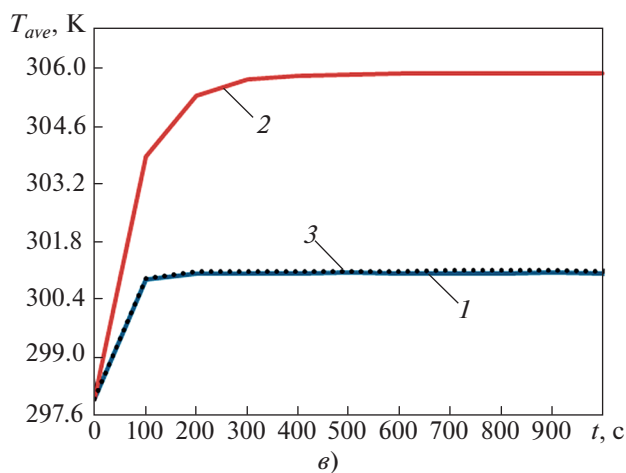
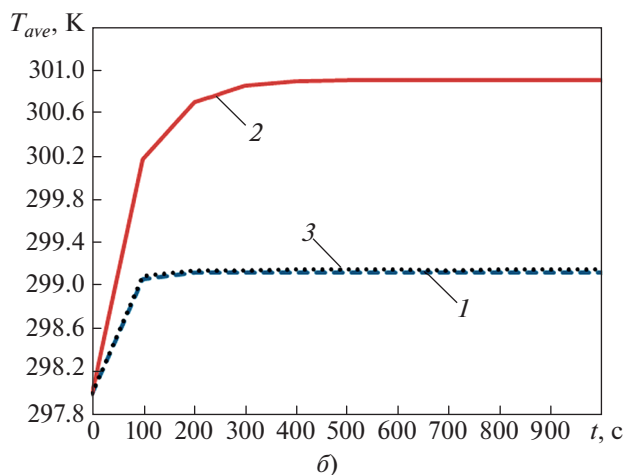
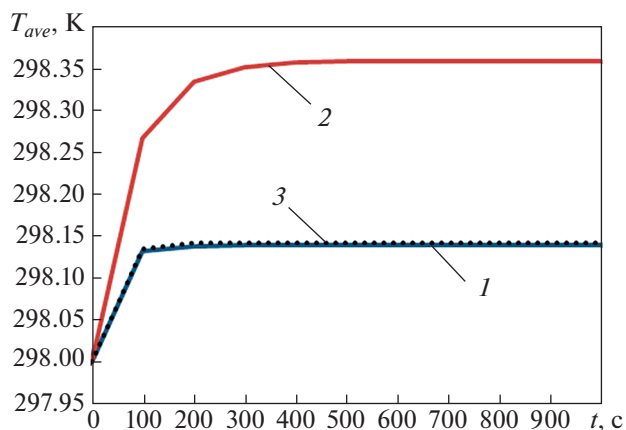
*Влияние охлаждающих жидкостей на среднюю температуру базового модуля при различных скоростях разряда*

На рис. 4 показано изменение средней температуры базового модуля при использовании различных охлаждающих жидкостей и трех скоростях разряда. Для изучения влияния скорости разряда скорость потока и температура на входе поддерживались постоянными: 2.0 л/мин и 298 К соответственно. На рисунке можно видеть, что при скорости разряда 1С тепла выделялось немного, так как значительного повышения температуры модуля не наблюдалось, поэтому дополнительное охлаждение не требовалось. При скоростях разряда 3С и 5С вода и наножидкость работали эффективнее и рост температуры был меньше по сравнению с ее повышением при охлаждении минеральным маслом.

*Влияние расхода теплоносителя на среднюю температуру базового модуля*

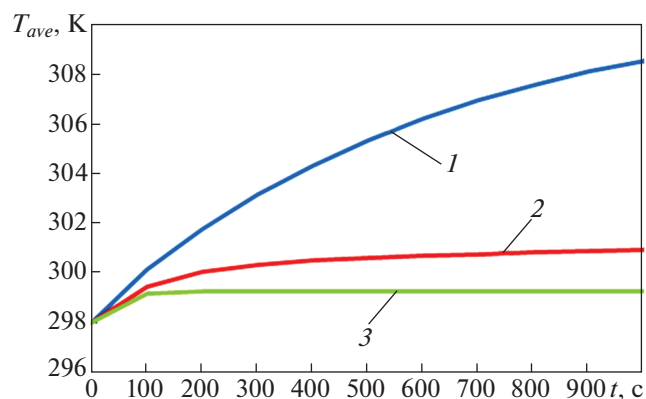
Чтобы понять, как влияет объемный расход теплоносителя на среднюю температуру модуля, скорость разряда и температура охлаждающей жидкости на входе поддерживались постоянными, равными 3С и 298 К соответственно. Результаты расчетов для трех значений расхода показаны на рис. 5. При более низком расходе (0.01 л/мин) температура аккумуляторной батареи монотонно повышалась, в то время как при более высоких расходах наблюдалась стабилизация средней температуры модуля.

При расходе около 1.0 л/мин температура оставалась практически постоянной на уровне примерно 299 К. Это можно объяснить тем, что охлаждающая жидкость при таком расходе предотвращает ее нагревание благодаря интенсивному отводу тепла. Численное исследование процесса охлаждения при использовании минерального масла и наножидкости было проведено

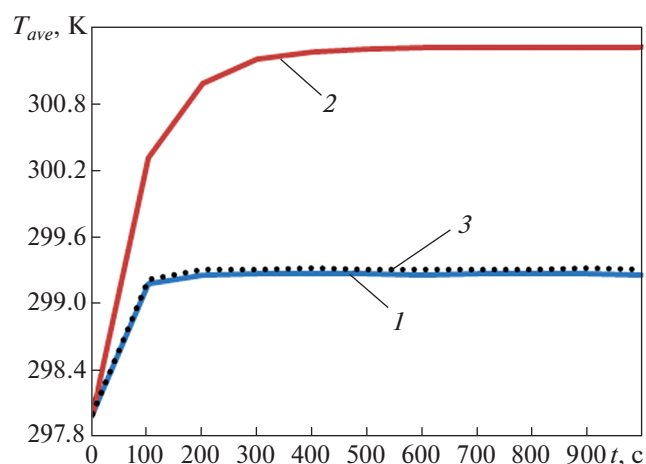


**Рис. 4.** Влияние охлаждающих жидкостей на среднюю температуру базового модуля при различных скоростях разряда. Скорость разряда: а – 1С; б – 3С; в – 5С. Охлаждающая жидкость: 1 – вода; 2 – минеральное масло; 3 – наножидкость

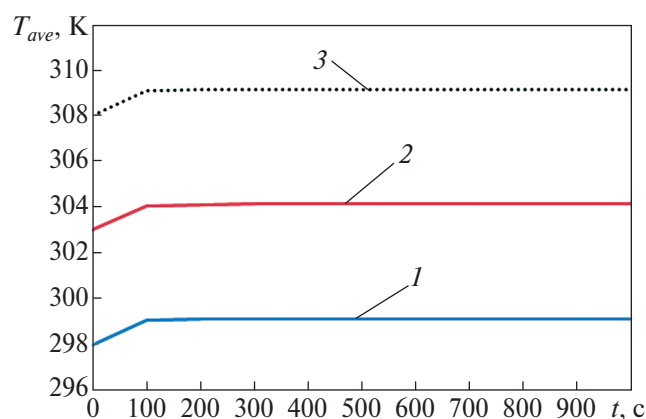
при таком же значении расхода охлаждающей жидкости. На рис. 6 показаны результаты расчетов, из которых можно сделать вывод, что вода и наножидкость обладают лучшей охлаждающей



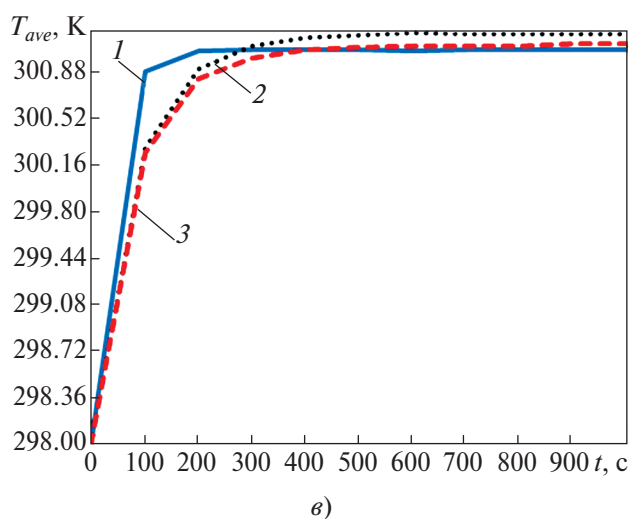
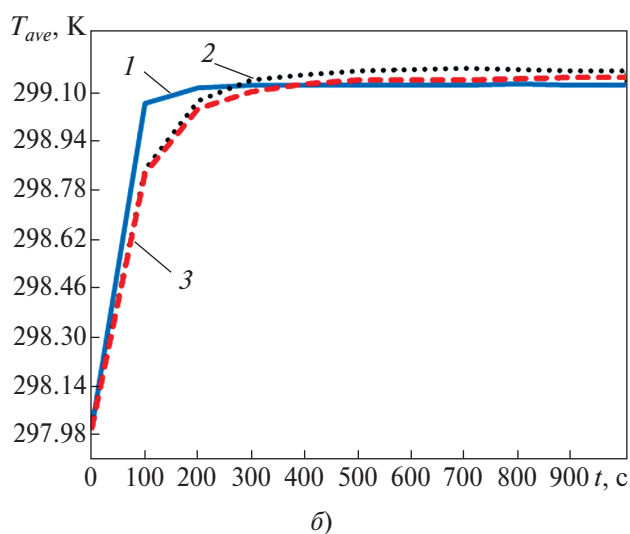
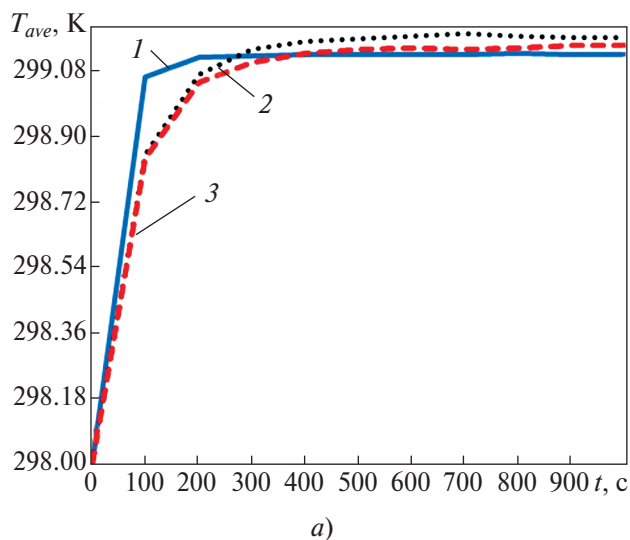
**Рис. 5.** Влияние объемного расхода воды на среднюю температуру базового модуля при скорости разряда 3С и температуре охлаждающей жидкости на входе 298 К. Объемный расход воды, л/мин: 1 – 0.01; 2 – 0.1; 3 – 1.0



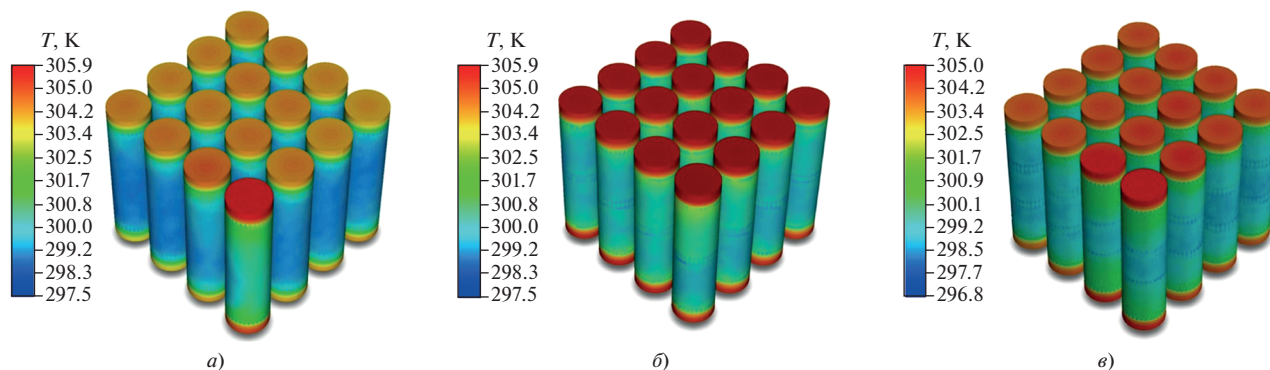
**Рис. 6.** Изменение средней температуры базового модуля при использовании различных охлаждающих жидкостей при их расходе 1.0 л/мин. Охлаждающая жидкость: 1 – вода; 2 – минеральное масло; 3 – наножидкость



**Рис. 7.** Влияние температуры охлаждающей жидкости (воды) на входе на среднюю температуру базового модуля. Температура на входе в модуль, К: 1 – 298; 2 – 303; 3 – 308



**Рис. 8.** Зависимости средней температуры модуля от времени для трех исследованных моделей при использовании воды в качестве охлаждающей жидкости. Скорость разряда: а – 5С; б – 3С; в – 1С. 1 – базовая модель; 2 – модель 1; 3 – модель 2



**Рис. 9.** Распределение температуры на поверхностях ячеек для модулей различной конструкции. *a* – базовая модель; *b* – модель 1; *c* – модель 2

способностью, чем минеральное масло. Для воды и наножидкости были проведены аналогичные расчеты при расходах 1.5 и 2.0 л/мин и было установлено, что повышение температуры при таких расходах было весьма незначительным по сравнению с результатами при расходе 1.0 л/мин (в настоящей работе данные этих расчетов не приводятся).

*Влияние температуры охлаждающей жидкости на входе на среднюю температуру базового модуля*

Для изучения влияния температуры охлаждающей жидкости на входе в модуль расход потока и скорость разряда поддерживались постоянными и равными 2 л/мин и 3С соответственно. Поскольку средние температуры модуля для воды и наножидкости практически совпадают и эффективность охлаждения с помощью этих жидкостей выше, чем при использовании минерального масла, моделирование проводилось только для воды и наножидкости. На рис. 7 показаны зависимости средней температуры модуля при трех различных температурах воды на входе: 298, 303, 308 К. На рисунке видно, что увеличение температуры охлаждающей жидкости на входе приводит к повышению температуры поверхности ячейки из-за снижения теплоотдачи. Это связано с тем, что разница между температурами охлаждающей жидкости и ячеек была небольшой. При температурах на входе 298, 303 и 308 К повышение средней температуры модуля составило 1, 1.2 и 1°С. Для наножидкости получены примерно такие же значения этого показателя: 1.1, 1 и 1.1°С соответственно (в данной работе график не приводится).

*Влияние структуры модели на среднюю температуру модуля*

Рисунок 8 иллюстрирует охлаждающую способность воды при скоростях разряда 5С, 3С и 1С

соответственно. Расход и температура охлаждающей жидкости на входе задавались постоянными 2.0 л/мин и 298 К.

Как видно на рис. 8, модели 1 и 2 работали лучше базовой в поддержании температуры на более низком уровне только в начале процесса охлаждения. Скорость разряда не оказывала существенного влияния на процесс охлаждения, однако у моделей 1 и 2 профиль температуры был более равномерный, чем у базовой модели. Из этого можно сделать вывод, что в сегментированном модуле при инверсионном охлаждении температура аккумуляторной батареи может поддерживаться равномерной. Об этом можно также судить по температурным полям, представленным на рис. 9.

На рис. 9 показаны температурные поля трех исследованных моделей для скорости разряда 5С, расхода 2.0 л/мин и температуры охлаждающей воды на входе 298 К. На рис. 9, *a* можно видеть, что модуль охлаждался неравномерно. Ячейка, наиболее удаленная от входа и выхода охлаждающей жидкости, имела температуру, достигавшую 302 К, в то время как у остальных ячеек температура не превышала 299 К. Неравномерное распределение температуры может отрицательно сказаться на производительности батареи в долгосрочной перспективе. Примечательно, что модели 1 и 2 демонстрируют более равномерное распределение температуры по всему модулю. Это доказывает, что в этих моделях колебания температуры внутри модуля успешно снижаются, что может иметь положительные последствия для общей производительности и долговечности батареи.

**ВЫВОДЫ**

1. При низкой скорости разряда (1С) все охлаждающие жидкости показали схожие результаты. При более высоких скоростях разряда (3С и 5С) охлаждающая способность воды и наножидкости

на основе  $Al_2O_3$  была лучше (меньший рост температуры), чем у минерального масла.

2. При больших расходах охлаждающей жидкости максимальный уровень температуры аккумулятора может быть снижен, тогда как при меньших ее расходах температура аккумулятора имеет тенденцию к непрерывному росту.

3. При любом увеличении температуры охлаждающей жидкости на входе средняя температура аккумуляторной батареи также повышается, так как разность между температурами охлаждающей жидкости и ячейки минимальна, вследствие чего теплоотдача становится меньше.

4. Среди трех рассмотренных модулей модели 1 и 2 показали лучшие результаты в поддержании низкой температуры аккумуляторной батареи в начальное время, при этом они работали аналогично базовой структуре в течение более длительного временного цикла.

5. Иммерсионное охлаждение с сегментированным охлаждением батарей при более высоких расходах и более низкой температуре охлаждающей жидкости на входе показало лучшие результаты по сравнению с обычным иммерсионным охлаждением. Это связано с постоянно наблюдаемой довольно большой разницей между температурами поверхностей элементов батареи и охлаждающей жидкости.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Immersion** cooling for lithium-ion batteries – A review / C. Roe, X. Feng, G. White, R. Li, H. Wang, X. Rui, C. Li, F. Zhang, V. Null, M.A. Parkes, Y. Patel, Y. Wang, H. Wang, M. Ouyang, G. J. Offer, B. Wu // *J. Power Sources*. 2022. V. 525. P. 231094. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231094>
2. **Kurmaev R.Kh., Struchkov V.S., Novak V.V.** Experience in the development of an effective thermal management system for the high-voltage battery of the vehicle // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. V. 819. Is. 1. P. 012020. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/819/1/012020>
3. **Dubey P., Pulugundla G., Srouji A.K.** Direct comparison of immersion and Cold-Plate based cooling for automotive Li-Ion battery modules // *Energies*. 2021. V. 14. Is. 5. P. 1259. <https://doi.org/10.3390/en14051259>
4. **Experimental** and simulative investigations on a water immersion cooling system for cylindrical battery cells / M. Luo, J. Cao, N. Liu, Z. Zhang, X. Fang // *Front. Energy Res.* 2022. V. 10. P. 803882. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.803882>
5. **Battery** thermal management by boiling heat-transfer / R.W. van Gils, D. Danilov, P.H.L. Notten, M.F.M. Speetjens, H. Nijmeijer // *Energy Convers. Manage.* 2014. V. 79. P. 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.12.006>
6. **Experimental** studies of liquid immersion cooling for 18650 lithium-ion battery under different discharging conditions / Y.Li, Z. Zhou, L. Hu, M. Bai, L. Gao, Y. Li, X. Liu, Y. Li, Y. Song // *Case Stud. Therm. Eng.* 2022. V. 34. P. 102034. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102034>
7. **Numerical** investigation of the direct liquid cooling of a fast-charging lithium-ion battery pack in hydrofluoro-ether / X. Tan, P. Lyu, Y. Fan, J. Rao, K. Ouyang // *Appl. Therm. Eng.* 2021. V. 196. P. 117279. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117279>
8. **Numerical** study on heat transfer characteristics of dielectric fluid immersion cooling with fin structures for lithium-ion batteries / J. Han, K.S. Garud, E. Kang, M. Lee // *Symmetry*. 2023. V. 15. Is. 1. P. 92. <https://doi.org/10.3390/sym15010092>
9. **Experimental** study on dielectric fluid immersion cooling for thermal management of lithium-ion battery / J. Han, K.S. Garud, S.-G. Hwang, M.-Y. Lee // *Symmetry*. 2022. V. 14. Is. 10. P. 2126. <https://doi.org/10.3390/sym14102126>
10. **Experimental** investigation and comparative analysis of immersion cooling of lithium-ion batteries using mineral and therminol oil / G. Satyanarayana, D.R. Sudhakar, V.M. Goud, J. Ramesh, G. Pathanjali // *Appl. Therm. Eng.* 2023. V. 225. P. 120187. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120187>
11. **Jithin K., Rajesh P.** Numerical analysis of single-phase liquid immersion cooling for lithium-ion battery thermal management using different dielectric fluids // *Int. J. Heat Mass. Transfer*. 2022. V. 188. P. 122608. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122608>
12. **Lithium-ion** battery thermal management system with  $Al_2O_3/AgO/CuO$  nanofluids and phase change material / M.T. Kiani, S. Omiddezyani, E. Houshfar, S.R. Miremadi, M. Ashjaee, A.M. Nejad // *Appl. Therm. Eng.* 2020. V. 180. P. 115840. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115840>
13. **Mitra A., Kumar R., Singh D.K.** Thermal management of lithium-ion batteries using carbon-based nanofluid flowing through different flow channel configurations // *J. Power Sources*. 2023. V. 555. P. 232351. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232351>
14. **Borshchev N.O.** Selected design parameters of a thermal management system for a lithium-ion phosphate battery // *E3S Web Conf.* 2023. V. 459. P. 10001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345910001>
15. **Influence** of temperature on the performance and life cycle of storage batteries / A. Solntsev, A. Asoyan, D. Nikitin, V. Bagrin, O. Fedushkina, S. Evtykov, A. Marusin // *Transp. Res. Proc.* 2021. V. 57. P. 652–659. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.096>
16. **Mathematical** modeling of the state of the battery of cargo electric vehicles / N.V. Martyushev, B.V. Malozyomov, S.N. Sorokova, E.A. Efremkov, M. Qi // *Math.* 2023. V. 11. Is. 3. 536. <https://doi.org/10.3390/math11030536>
17. **Mathematical** modeling the performance of an electric vehicle considering various driving cycles / N.V. Martyushev, B.V. Malozyomov, S.N. Sorokova, E.A. Efre-

- menkov, M. Qi // *Math*. 2023. V. 11. Is. 11. 2586.  
<https://doi.org/10.3390/math11112586>
18. **Sidorov K.M., Grishchenko A.G.** An experimental investigation of electrical and thermal performance of battery pack for zero emission vehicle // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. V. 272. Is. 2. P. 022172.  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022172>
19. **Tete P.R., Gupta M.M., Joshi S.S.** Numerical investigation on thermal characteristics of a liquid-cooled lithium-ion battery pack with cylindrical cell casings and a square duct // *J. Energy Storage*. 2022. V. 48. P. 104041.  
<https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104041>
20. **Bernardi D.M., Pawlikowski E.M., Newman J.** A general energy balance for battery systems // *J. Electrochem. Soc.* 1985. V. 132. No. 1. P. 5–12.  
<https://doi.org/10.1149/1.2113792>

## Numerical Investigations on Immersion Cooling of Lithium-Ion Batteries Using Different Coolants

**G. Ajay<sup>a</sup>, R. Krishna<sup>a</sup>, B. Mythirayan<sup>a</sup>, and T. S. Vikram<sup>a, \*</sup>**

<sup>a</sup> *School of Mechanical Engineering, SASTRA Deemed to be University, Thanjavur, 613401 India*

<sup>\*</sup>*e-mail: harivikram@mech.sastra.edu*

**Abstract**—Due to its increased energy density, longer lifespan, long cycle life, and quick charging capabilities, lithium-ion batteries (LIBs) have become increasingly popular over the past few years in household appliances, electric vehicles, and in the energy sector, such as for energy storage at thermal power plants. Batteries can be used to store excess energy from solar panels and wind turbines for use during periods of low energy production (at night or on windless days). This increases the efficiency and stability of renewable energy sources. However, LIB is extremely sensitive to temperature, presenting difficulties with thermal management. This study involves the numerical analysis of a  $4 \times 4$  arrangement of LIB cells with immersion cooling and is conducted using three different cooling fluids, including water, mineral oil, and  $Al_2O_3$ /water nanofluid. The modelling is carried out using Solidworks, and thermal analysis is carried out in ANSYS Fluent. By varying the operational and geometrical parameters, their effects on thermal performance were studied. The results show that water and nanofluid work better than mineral oil. At higher discharge rates of 3C and 5C, water and nanofluid limit the average temperature rise of the battery module under  $5^\circ C$ . Varying the flow rates from 10 mLPM to 1.0 LPM showed that the average temperature decreased with an increase in flow rate. When changing the inlet temperature of the battery module from 298 K to 308 K, it resulted in increased cell surface temperature and decreased heat transfer. The study shows that with a high flow rate and a low inlet temperature, the temperature rise is minimal even at a higher discharge rate of 5C.

*Keywords:* Li-ion battery, battery thermal management system, immersion cooling, discharge rate C, coolants