

УДК 621.355

Исследование методов моделирования цилиндрической батареи электромобилей при раздавливании

Чжоу Цзинбо

jingbo.zhou@yandex.ru

Зузов Валерий Николаевич^(*)

valeryzuz@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. С целью изучения поведения батареи под действием внешних сил и выбора метода моделирования батареи для случая столкновения электромобилей, были рассмотрены три варианта моделей цилиндрической батареи: детализированная модель, модель RVE и гомогенизированная модель. В программе LS-DYNA проведены три соответствующих вида расчетов при раздавливании. Были сравнены точность, скорость решения и другие особенности трех моделей. Получены критические значения повреждения модели RVE и гомогенизированной модели — 88,4 и 106 МПа. Сделан вывод о том, что гомогенизированную модель можно использовать при многовариантных исследованиях их поведения при столкновении электромобилей.

Ключевые слова: метод конечных элементов, моделирование аккумулятора, цилиндрический аккумулятор, литиевая батарея, LS-DYNA, электромобиль

Research on modeling methods for electric vehicle cylindrical battery under crush

Zhou Jingbo

jingbo.zhou@yandex.ru

Zuzov Valery Nikolaevich^(*)

valeryzuz@yandex.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. In order to study the behavior of the battery under the action of external forces and select a battery modeling method for EV collision simulation, three versions of the cylindrical battery model were considered: a detailed model, an RVE model, and a homogenized model. Three corresponding crushing simulations were performed in LS-DYNA. The accuracy, solution speed, and other features of the three models were compared. The critical damage values of the RVE model and the homogenized model were obtained — 88.4 and 106 MPa. It was concluded that the homogenized model can be used directly in EV collision simulation.

Keywords: finite element method, battery simulation, cylindrical battery, lithium battery, LS-DYNA, electric vehicle

Введение. В последние годы интенсивно развивались транспортные средства на электрической тяге и, соответственно, количество электромобилей быстро росло. С увеличением количества электромобилей вопросы их безопасности становились все более актуальными. Электромобили породили новые проблемы безопасности при столкновении, а именно проблемы безопасности в следствие возгорания батарей при столкновении.

По сравнению с традиционными автомобилями, опасности, с которыми сталкиваются пассажиры при авариях на электромобилях, более серьезны из-за наличия высокоэнергетических батарей:

- аварии с большей вероятностью могут привести к пожару или даже взрыву;
- сгорание происходит намного быстрее, а время эвакуации короче;
- возгорание аккумуляторных батарей трудно потушить, и оно может повториться;
- существует риск утечки электролита аккумуляторной батареи;
- существует опасность от высоковольтных линий и оборудования [1, 2].

Риски возгорания и опасности, связанные с высокоэнергетическими батареями, стали основными проблемами безопасности электромобилей. Моделирование представляет собой эффективный метод исследования безопасности батарей. Исследование методов моделирования аккумуляторной батареи электромобиля является актуальным.

Целью исследования является изучение поведения аккумулятора под действием внешних сил на базе разработанных моделей разного уровня для выбора предпочтительного метода моделирования и последующих многовариантных исследований последствий столкновения электромобилей.

Обзор конструкции цилиндрической аккумулятора. В настоящее время аккумуляторами большинства электромобилей, представленных на рынке, являются литий-ионные. Они в зависимости от конструктивной формы делятся на три типа, а именно цилиндрические, квадратные с твердой оболочкой, ламинированные в мягкой упаковке. Объектом исследования является цилиндрический литий-ионный аккумулятор, так как такие аккумуляторы наиболее широко используются. Цилиндрический аккумулятор состоит из электрической сердцевины, корпуса аккумулятора, ушка полюса и т. д., и в основном изготавливается в виде цилиндра. Электрическая сердцевина, имеющая многослойную структуру, состоит из слоев активного материала, сепараторов, коллекторов, и электролита. Активный слой катода, активный слой анода и сепаратор являются ключевыми компонентами, участвующими в электрохимической реакции, и все они обладают пористой структурой [3]. Электролит представляет собой жидкость, и его влияние на прочность аккумулятора в настоящее время не рассматривается.

Модели цилиндрической аккумуляторной батареи при раздавливании. Нагрузки батарей делятся на статические и динамические (ударные). В данной работе в исследованиях используется типичный статический режим — раздавливание. По стандарту ГОСТ Р МЭК 62660-3-2024 раздавливание проводят с инструментом в виде круглой или полукруглой болванки (индентор) со скоростью не более 6 мм/мин (рис. 1). Индентор перестает сжимать аккумулятор при повреждении аккумулятора (при этом происходит резкое уменьшение напряжения или реакции), в отличие от порогового значения отключения, рекомендуемого ГОСТ.

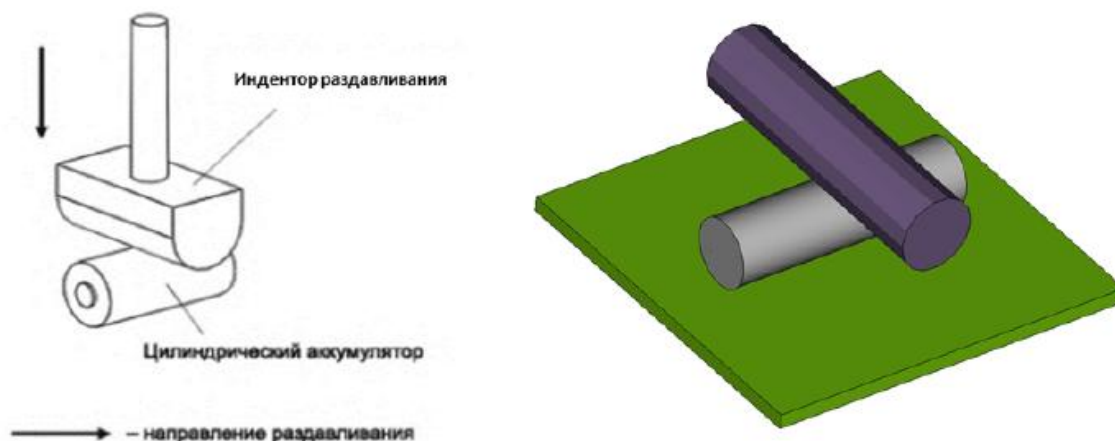


Рис. 1. Схема испытания на раздавливание

В настоящее время существует три основных типа моделирования аккумуляторной батареи: детализированная модель, модель RVE (representative volume element) и гомогенизированная модель [4].

Детализированная модель основывается на детальных механических испытаниях для определения основных параметров и моделировании материала каждого компонента. Нами построена детализированная модель (рис. 2, а), которая состоит из вала, анода, катода, сепаратора и корпуса. Используем твердотельные конечные элементы для анода, катода, сепаратора, а для вала и корпуса выбираем конечные элементы оболочечного типа. Модель имеет 1520 элементов оболочечного типа и 115520 твердотельных элементов. Моделируется контакт с общим узлом между электродами и коллекторами, для других — метод автоматического контакта поверхность к поверхности. Свойства материала приведены в литературе [5]. Время расчета составляет более месяца.

Модель RVE — модель элемента репрезентативного объема, определяется как наименьший объем, в пределах которого может быть произведено измерение, которое даст значение, репрезентативное для всей батареи. Аналогичным образом, основываясь на этой идее, можем упростить детализированную модель, и построить трехслойную модель RVE (рис. 2, б). Модель состоит из вала, RVE (анода, катода, сепаратора) и корпуса. Также используем твердотельные элементы для анода, катода, сепаратора и элементы оболочки для корпуса, но для вала выбираем твердотельные элементы, так как наблюдается большая деформация из-за низкого качества сетки с использованием элементов оболочки. Модель имеет 472 элемента оболочки и 5566 твердотельных элементов. Моделируется контакт с общим узлом между слоями, для других — метод автоматического контакта поверхность к поверхности. Свойства материала приведены в литературе [5]. Расчет занимает 7 часов 45 минут.

Если задать внутренние компоненты как сердцевина с интегральными свойствами, то получим гомогенизированную модель, состоящую из внутренней сердцевины и корпуса (рис. 2, в). Используем твердотельные элементы для моделирования сердцевины и элементы оболочки для корпуса. Мо-

дель имеет 968 элемента оболочки и 2244 твердотельного элемента. Используется метод автоматического контакта поверхность к поверхности для всех контактов. Свойства материала приведены в литературе [6]. Расчет занимает около 4 часа 30 минут.

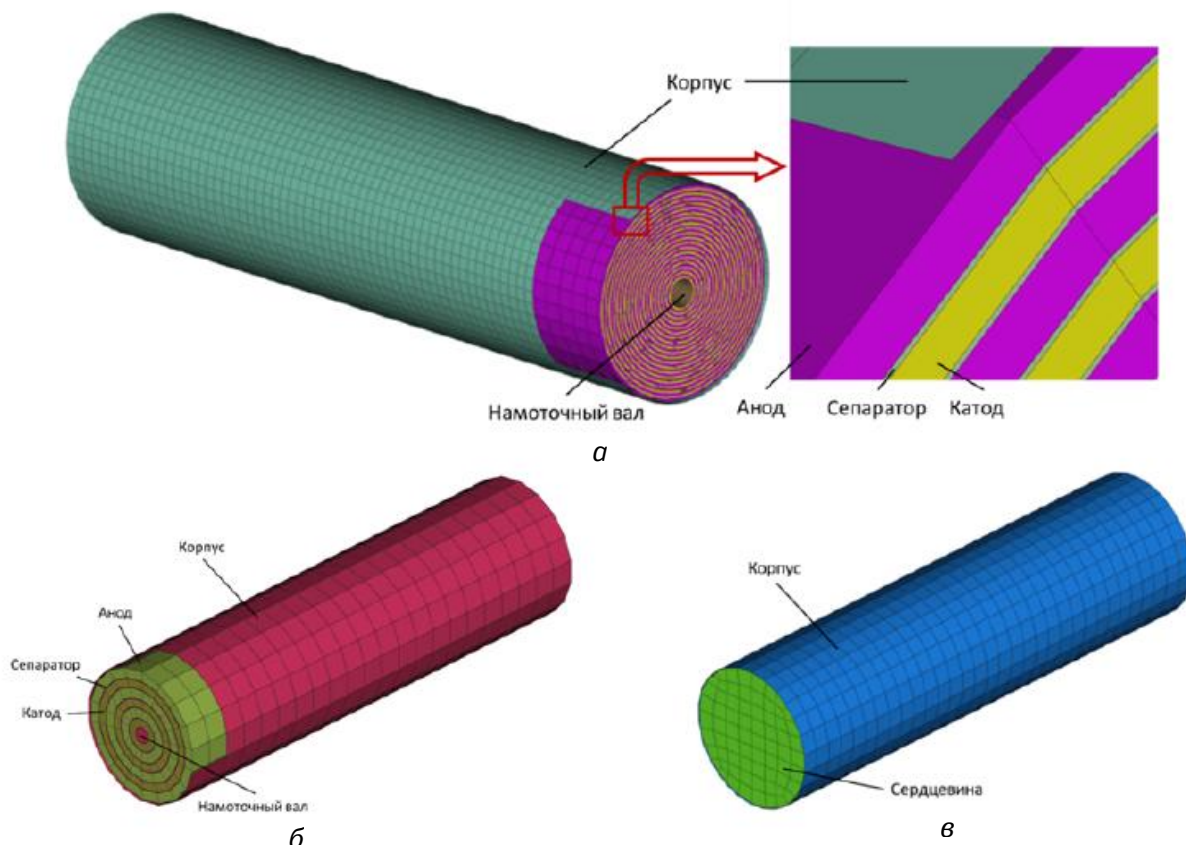


Рис. 2. Три варианта моделей:

а — детализированная; б — трехслойная RVE; в — гомогенизированная

Что касается критериев разрушения, точка резкого падения силы реакции (или падения напряжения) считается началом повреждения материалов сердцевины батареи, а механическое напряжение по фон Мизесу выбирается в качестве оценочной переменной для получения критического значения при возникновении повреждения. Повреждение корпуса оценивается по пластической деформации. В LS-DYNA установлена точка повреждения корпуса при пластической деформации на значение 0,03, и элементы с пластической деформацией, достигающей 0,03, будут удалены [6].

Результаты. Результат, который больше всего интересует — это механические свойства батареи, т. е. соотношение между силой и деформацией батареи. Модель упрощается на основе именно механического свойства, чтобы симулировать механические поведения аккумулятора при ударе. Нас также беспокоит напряженно-деформированное состояние внутри аккумулятора.

Из-за слишком длительного времени расчета была выполнена только часть расчета детализированного моделирования. Получены следующие результаты (рис. 3).

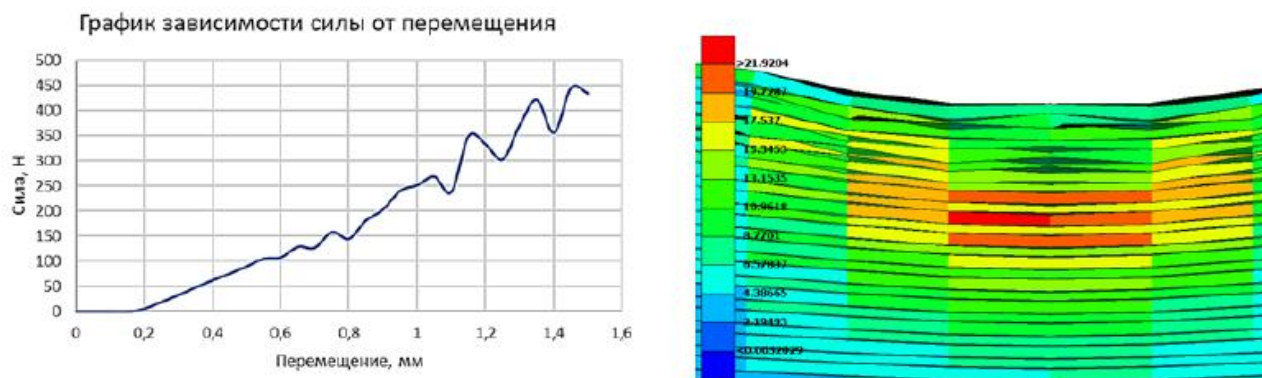


Рис. 3. График зависимости силы от перемещения (слева) и напряженное состояние внутри аккумулятора (справа)

График соотношение между силой и деформацией батареи и состояние основного напряжения внутри аккумулятора трехслойной модели RVE представлены ниже (рис. 4).

Результаты гомогенизированного моделирования показаны ниже (рис. 5).

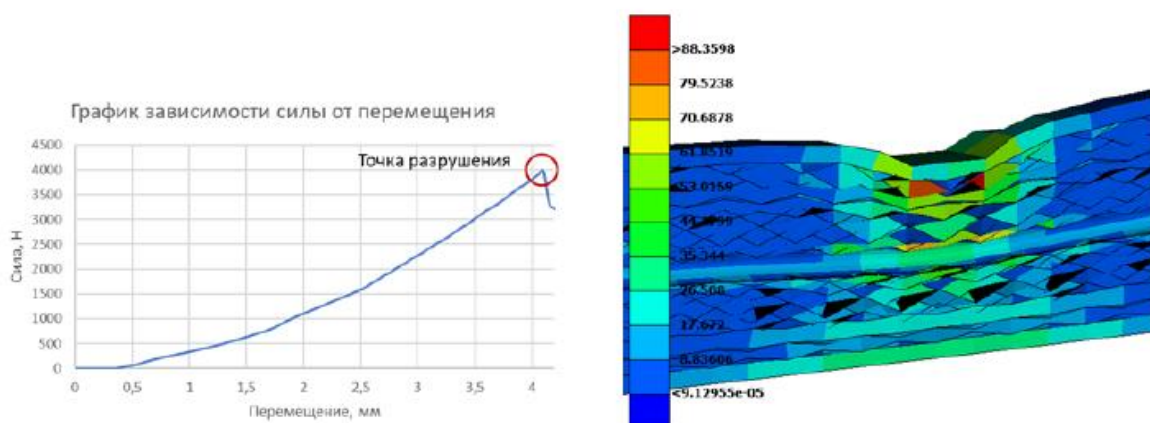


Рис. 4. График зависимости силы от перемещения (слева) и напряженное состояние внутри аккумулятора (справа)

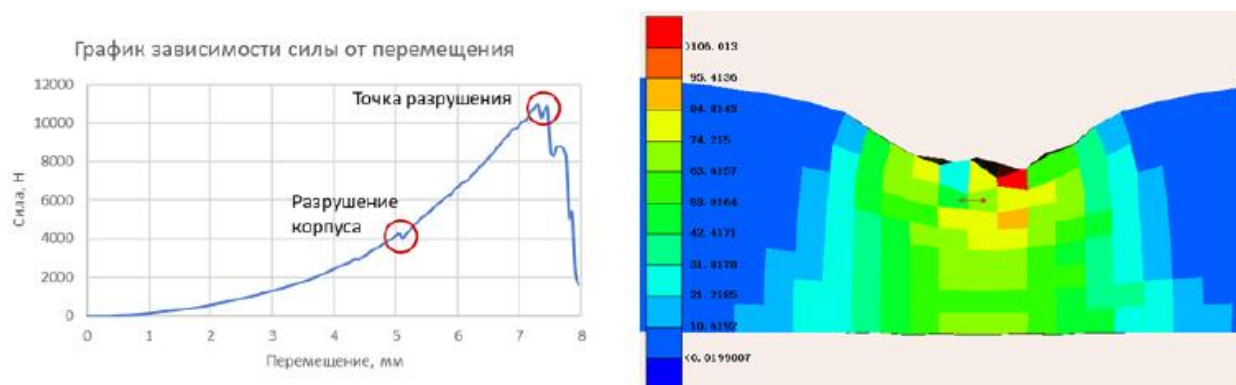


Рис. 5. График зависимости силы от перемещения (слева) и напряженное состояние внутри аккумулятора (справа)

Обсуждение полученных результатов. Хотя точность детализированной модели является самой высокой, достижение высокой точности требует соответствующих вычислительных ресурсов, что для нас не приемлемо, поскольку нужны многовариантные исследования. На графике (рис. 3) видно, что кривая значительно меняется. Внутри аккумулятора (рис. 3) можно наблюдать детальное напряженно-деформированное состояние каждого компонента и точно определить место повреждения с использованием определенного критерия.

Скорость решения трехслойной модели RVE намного выше, чем у детализированной модели. Из графика (рис. 4) наблюдается точка внезапного снижения силы, и считается началом разрушения. А внутри аккумулятора (рис. 4) можно определить, какой компонент повреждается первым при каком напряжении (или деформации), но определить точное место повреждения невозможно.

Стоит отметить, что в детализированной модели и модели RVE из-за многослойной структуры и цилиндрической формы модели, чем ближе сетка к центру, тем меньший размер требуется, тем ниже качество сетки получается. Эту проблему можно облегчить в какой-то степени за счет использования вала. Но с совершенствованием технологии производства вал в центре цилиндрической батареи больше не используется. Необходимо разработать модель без вала.

Гомогенизированная модель является самой простой в моделировании и обладает наивысшей скоростью решения. Из графика (рис. 5), кроме точки разрушения сердцевины, наблюдается еще разрушение корпуса. В этой точке сила уменьшается из-за удаления элементов корпуса, которые достигли точки разрушения. А внутри аккумулятора (рис. 5) модель может отражать только приблизительное место максимального напряжения.

Таким образом, детализированная модель не будет изучаться глубоко из-за слишком длительного времени расчета; модель RVE будет применяться для определения критерия разрушения, так как при этом рассматривается какой материал повреждается и при каком условии, а место повреждения не важно; гомогенизированная модель будет использоваться в моделировании столкновений электромобилей благодаря своей чрезвычайно высокой вычислительной эффективности и приемлемой точности.

Заключение. Используя в качестве объекта цилиндрические батареи, были изучены три существующих метода моделирования при режиме раздавливания, были проанализированы особенности этих трех методов. Сделаны выводы следующим образом.

Согласно результатам по механическим свойствам, полученная точность гомогенизированной модели на 10 % выше, чем у трехслойной модели RVE, и точность трехслойной модели RVE на 30 % выше, чем у детализированной модели.

Скорость решения однородной модели примерно в два раза выше, чем у трехслойной модели RVE, и в 100 раз выше, чем у детализированной модели.

Расчет детализированной модели был прекращен из-за слишком большого времени решения до повреждения, максимальное напряжение составляет 21,9 МПа, и находится в шестом слое анодного материала под индентором.

Трехслойная модель RVE повреждается при перемещении индентора на 4,1 мм под действием силы 3971 Н. Критическое напряжение — 88,4 МПа.

В гомогенизированной модели происходит разрушение корпуса при перемещении индентора на 5,05 мм силой 4268 Н, а при перемещении 7,35 мм силой 10290 Н — повреждение сердцевины. Критическое напряжение разрушения сердцевины — 106 МПа.

При раздавливании максимальное напряжение в трех моделях находится примерно в 2 мм под индентором.

Список источников

- [1] Niu X., Niu G. Research on safety risk analysis and fire extinguishing and rescue disposal technology of pure electric vehicles. *Auto Time*, 2024, vol. 7, pp. 88–90. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9668.2024.07.029>
- [2] Hu Y., Du T., Zhang X. Analysis and research on the traffic accident scene of battery electric vehicle. *Automobile Technology*, 2021, vol. 46, no. 23, pp. 181–184. <https://doi.org/10.16638/j.cnki.1671-7988.2021.023.051>
- [3] Li H., Zhang C., Cao J. Advances and perspectives on modeling methods for collision safety of lithium-ion batteries. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, vol. 58, no. 24, pp. 121–144. <https://doi.org/10.3901/JME.2022.24.121>
- [4] Zhu J., Wierzbicki T., Li W. A review of safety-focused mechanical modeling of commercial lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 2018, vol. 378, pp. 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.12.034>
- [5] Ли Чжицзе. Испытание на разрушение при нагрузочной деформации и имитационный анализ внутреннего слоя литиевых батарей квадратной формы для транспортных средств с новой энергией. Дис. ... д-ра техн. наук. Гуанчжоу, 2021, 177 с.
- [6] Sahraei E., Campbell J., Wierzbicki T. Modeling and short circuit detection of 18650 Li-ion cells under mechanical abuse conditions. *Journal of Power Sources*, 2012, vol. 220, pp. 360–372. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.057>