

УДК 621.331.5

ОБ АНАЛИЗЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ТЕПЛООБМЕННИКЕ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ ТЯГОВОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

Рябцев Фёдор Александрович, студент,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, ryabtsev.fedor@yandex.ru

Климов Александр Владимирович, канд. техн. наук, ст. преподаватель,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, klimmanen@mail.ru

Биксалеев Ринат Шакирович, аспирант
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Россия 125438, Москва, Автомоторная ул., 2,
trink007@yandex.ru

Ухов Иван Владимирович, студент,
МАДИ, Россия, 125319, Москва, Ленинградский пр., 64, ivan-uhov@mail.ru

Аннотация. Работоспособность и функционирование тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) является наиболее важным вопросом, рассматриваемым при проектировании электрифицированного транспортного средства. В современном электромобиле присутствует ряд систем, обеспечивающих поддержание характеристик ТАБ. А именно, ключевую роль играет система термостатирования, поддерживающая нормальный температурный режим. Данная система бывает как воздушная, так и жидкостная. Авторы отмечают, что жидкостная система более эффективна с точки зрения теплообмена и позволяет получить максимально стабильный температурный режим. С целью определения оптимальных параметров гидравлического сопротивления и массового расхода рассматривается подход применения метода конечных элементов расчёта. В статье рассматривается модель расчёта гидравлического сопротивления теплообменника, позволяющая производить расчёт параметров системы терморегулирования ТАБ. В результате анализа авторы приходят к выводу, что данная модель позволяет получить необходимые данные, которые позволяют судить о конструкции элементов системы терморегулирования. Также отмечается, что для проведения наиболее полного расчёта необходимо провести моделирование теплового состояния аккумуляторов.

Ключевые слова: система терморегулирования, тяговая аккумуляторная батарея, теплообменник, гидравлические потери, поток теплоносителя, метод конечных элементов.

CREATION AND ANALYSIS OF A MODEL FOR CALCULATION OF HYDRAULIC LOSSES IN A HEAT EXCHANGER

Ryabtsev Fyodor A., student,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, ryabtsev.fedor@yandex.ru

Klimov Aleksandr V., associate professor, senior lecturer
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, klimmanen@mail.ru

Biksaleev Rinat Sh., postgraduate,
FSUE "NAMI", 2, Avtomotornaya st., Moscow, 125438, Russia, trink007@yandex.ru

Ukhov Ivan V., student,
MADI, 64, Leningradsky Prosp., Moscow, 125319, Russia, ivan-uhov@mail.ru

Abstract. The performance and functioning of the traction battery (TAB) is the most important issue considered when designing an electrified vehicle. In a modern electric car, there are a number of systems that ensure the maintenance of the characteristics of the TAB. Namely, the key role is played by the temperature control system, which maintains a normal temperature regime. This system can be both air and liquid. The authors note that the liquid one is more efficient in terms of heat transfer and allows you to get the most stable temperature regime. In order to determine the optimal parameters of hydraulic resistance and mass flow, the approach of applying the finite element method of calculation is considered. The article considers a model for calculating the hydraulic resistance of a heat exchanger, which allows calculating the parameters of the TAB thermal control system. As a result of the analysis, the authors come to the conclusion that this model allows us to obtain the necessary data that allow us to judge the design of the elements of the thermal control system. It is also noted that for the most complete calculation, it is necessary to conduct a simulation of the thermal state of the batteries.

Key words: Thermal control system, traction battery, heat exchanger, hydraulic losses, coolant flow, finite element method.

Введение

Тяговая аккумуляторная батарея (ТАБ) является одним из наиболее важных и дорогостоящих элементов современного электрифицированного транспортного средства [1, 2]. Функциональность ТАБ, её долговечность и безопасность ЭТС в целом зачастую зависят от температурных условий работы. Для поддержания ТАБ в нормальном тепловом режиме, обеспечивающих нормальную, без снижения выходных параметров работу

в течение всего срока службы, заверенного производителем, необходима система терморегулирования. Данная система должна поддерживать температуру в пределах от $+20^{\circ}\text{C}$ до $+30^{\circ}\text{C}$ [3]. Немало важным фактором является также эффективность теплообмена в системе между теплоносителем и аккумуляторами, как источниками тепла. Система терморегулирования может быть как воздушной, так и жидкостной. Наиболее оптимальной с точки зрения эффективности теплообмена считается последняя, так как она позволяет получить наиболее стабильные температурные характеристики [4]. Поэтому при проектировании накопителей очень важно уделять особое внимание конструкции и функциональности таких систем. В целом данная система внутри батареи представляется в виде одного или совокупности теплообменников, соединенных трубопроводами, по которым циркулирует теплоноситель. При проектировании ТАБ необходимо проводить расчёты элементов теплообменников, которые находятся внутри контейнера.

Для обеспечения надлежащего подведения и отведения тепловой энергии необходимо обеспечивать требуемые параметры режима течения жидкости внутри системы без срыва потока, при одинаковых скоростях истечения. Анализ данных явлений можно производить на натуральных образцах, но это влечет за собой высокие материальные затраты денежных средств, материалов и прочих ресурсов. При этом также увеличивается время на разработку, доводку таких систем, что для современной автомобильной технике недопустимо исходя из тенденции к снижению времени вывода на рынок готовых изделий и себестоимости. Поэтому широко используются высокопроизводительные методы имитационного моделирования виртуальной эксплуатации как транспортного средства, так и отдельных систем с применением цифровых двойников.

Для анализа гидравлических процессов, протекающих в системах терморегулирования ТАБ имеется ряд различных программных продуктов.

Например, система *KOMPAS-3D* с пакетом расширения *KompasFlow* [5] позволяет производить расчёт и визуализацию данных в реальном времени и в дальнейшем оперативно влиять на параметры протекания явления и выходные характеристики изделия.

Моделирование гидравлических процессов

В основе расчёта гидравлических потерь в системе *KompasFlow* лежит уравнение Навье – Стокса [5] для несжимаемой жидкости, которое имеет вид:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla P + \vec{f},$$

где ∇ – оператор Набла;

Δ – векторный оператор Лапласа;

t – время;

ν – коэффициент кинематической вязкости;

ρ – плотность;

P – давление;

\vec{v} – векторное поле скорости;

\vec{f} – векторное поле массовых сил.

Гидравлическое сопротивление также можно посчитать аналитически, используя уравнение Бернулли [6]:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + \sum h_{\text{пот}},$$

Где z_1 и z_2 – геометрический напор;

$\frac{P_1}{\rho g}$ и $\frac{P_2}{\rho g}$ – пьезометрический напор;

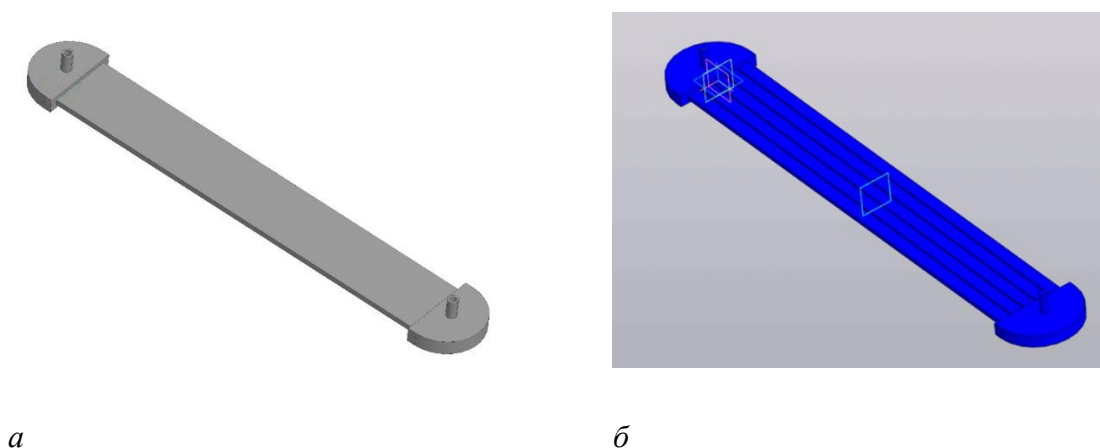
$\frac{v_1^2}{2g}$ и $\frac{v_2^2}{2g}$ – скоростной напор;

α_1 и α_2 – безразмерный коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей;

$\Sigma h_{\text{пот}}$ – суммарная потеря полного напора на участке между рассматриваемыми сечениями.

Во время движения реального потока жидкости внутри участка трубопровода действуют силы внутреннего трения, которые связаны с режимом движения и вязкостью жидкости. Также возникают потери, связанные с размерами и формой трубопровода, называемыми местными.

Для обеспечения необходимого температурного состояния аккумуляторов была разработана конструкция пластинчато-трубчатого секционного теплообменника. Общий вид одной секции теплообменника показан на рисунке 1а.



*Рис.1. Секция теплообменника;
а - общий вид; б - объём жидкости*

Для расчёта потерь давления в теплообменнике необходимо сформировать 3D модель объёма жидкости, протекающей в полостях элемента теплообменника, показанного на рисунке 1б. Общий вид всей системы, расположенной внутри батареи, изображена на рис. 2.

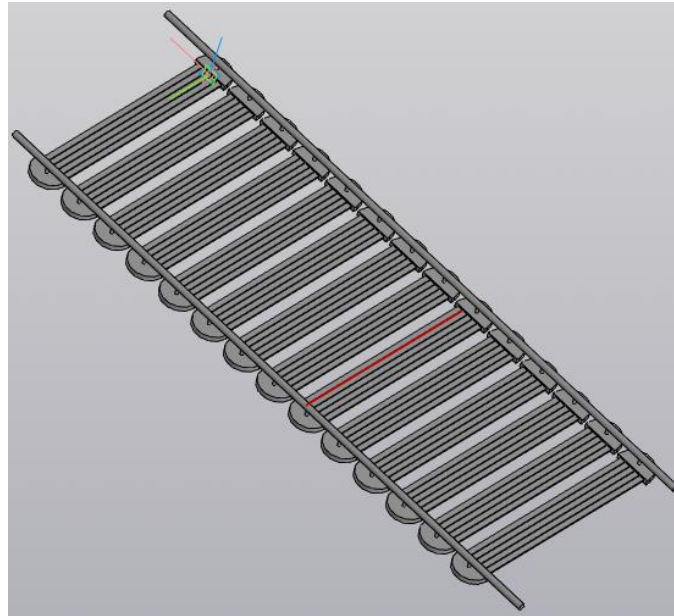


Рис.2. Схема системы теплообменников

Параметры расчёта и характеристика теплоносителя [7] представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры расчёта

Параметр	Значение
Опорное давление, P	101000 Па
Опорная температура, T	273 К
Теплоноситель	вода, агрегатное состояние – жидкость
Плотность, ρ	1000 кг/м ³
Массовый расход, \dot{m}	2 кг/с
Молярная масса, M	$18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль
Динамическая вязкость, μ	$1003 \cdot 10^6$ Па·с
Кинематическая вязкость, ν	$1,005 \cdot 10^6$ м ² /с
Теплопроводность, λ	0,599 Вт/м·град
Удельная теплоёмкость, C_p	4,182 кДж/(кг·К)

Удельная энтальпия, h	83,91 кДж/кг
Коэффициент объёмного теплового расширения, β	$1,82 \cdot 10^{-4}$ град ⁻¹
Коэффициент поверхностного натяжения, σ	$726,9 \cdot 10^{-4}$ Н/м;
Моделируемое время	10 с

Формирование визуализационных слоёв позволяет наглядно оценить результаты расчётов, на основе которых можно сделать вывод о правильности конструкции теплообменника [8].

Расчёт модели в *KompaFlow* позволяет узнать скорость, давление, массовый и объёмный расход, силу и плотность теплоносителя [9]. Данный расчёт производится для того, чтобы понять, как протекает теплоноситель в теплообменнике. На основе этого определяется поток и необходимая скорость, которая сможет обеспечить равномерную теплопередачу. Ламинарный поток способствует хорошей передачи тепла от батареи к теплоносителю.

Произведя расчёт с массовым расходом теплоносителя 1 кг/с, выяснили, что гидравлическое сопротивление теплообменника составляет 111488 Па. На рис. 3 изображены линии тока, которые указывают скорость протекания теплоносителя, где можно наблюдать, что поток неравномерный и происходит заклинивание некоторых каналов. Это говорит о том, что при данных условиях теплообменник не сможет обеспечить оптимальную теплопередачу.

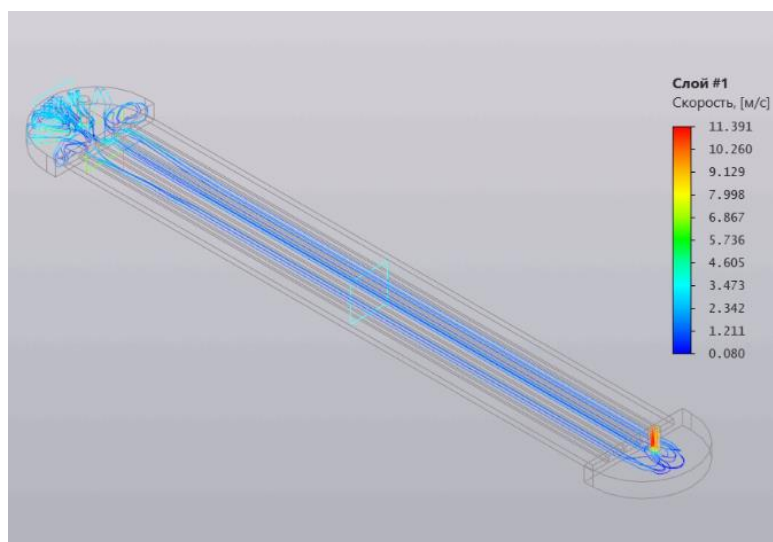


Рис.3. Скорость теплоносителя

Уменьшив расход теплоносителя до 0,1 кг/с и произведя расчёт, было выяснено, что гидравлическое сопротивление в теплообменнике составило 1199,11 Па. На рис.4 линии тока указывают, что скорость протекания теплоносителя равномерна во всех частях теплообменника. На рис.5 можно наблюдать, что давление теплоносителя также равномерно на всей площади теплообменника. Исходя из этого, можно сделать вывод, что конструкция теплообменника, рассмотренная в настоящей статье, обеспечивает возможность организации оптимального теплового режима. [10].

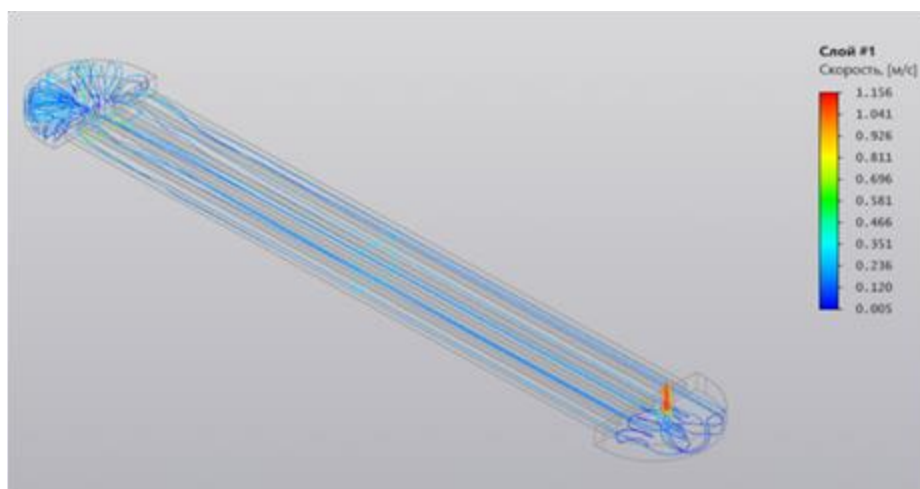


Рис.4. Скорость теплоносителя

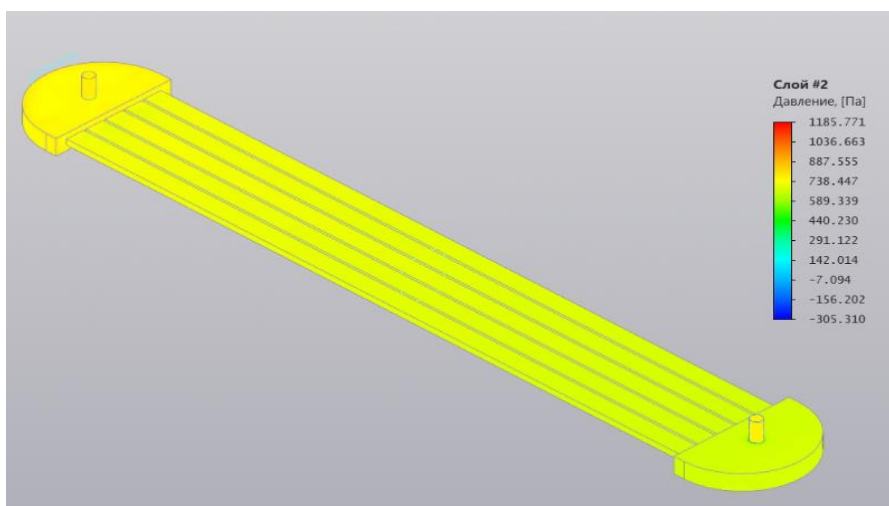


Рис. 5. Давление теплоносителя

Заключение

В статье был рассмотрен способ расчёта гидравлического сопротивления в различных системах терморегулирования приборов с помощью системы *KOMPAS-3D KompasFlow*. Благодаря данной модели удалось определить необходимый массовый расход теплоносителя, который обеспечивает равномерное течение внутри теплообменной пластины, а также наиболее низкие гидравлические потери. Помимо этого, были сформированы потоки жидкости, которые позволят оценить распределение теплоносителя в полостях исследуемых элементов. Эти данные позволяют анализировать конструкцию элементов системы терморегулирования.

Для более правильного и полного расчёта в дальнейшем необходимо провести моделирование теплового состояния аккумуляторов. Это позволит рассчитать тепловой поток и коэффициент теплопередачи, который является наиболее важным параметром при конструировании системы терморегулирования.

Список литературы

1. Нагайцев, М.В. Электромобили. / М.В. Нагайцев, А.А.Эйдинов – Типография НАМИ, 2014. – 575с.
2. Карпухин, К. Е. Об аспектах безопасности тяговых аккумуляторных батарей электрифицированных транспортных средств. Анализ факторов, влияющих на их ресурс, и некоторые методы его оценки / К.Е. Карпухин, Р.Ш. Биксалеев, А.В. Климов, Б.К. Оспанбеков // Труды НАМИ. – 2017. – №6(107). – С26–29.
3. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review / S. Ma, M.Jiang, P.Tao, C.Song, J.Wu et al. // Progress in Natural Science: Material International. – 2017. – №27. – P. 654 – 664.
4. Слабоспицкий, Р.П. Анализ перспективных систем охлаждения аккумуляторных батарей / Р.П. Слабоспицкий, М.А. Хажмурадов, В.П. Лукьянова // Радиоэлектроника и информатика. – 2013. – №2
5. KompasFlow [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – URL: <https://ascon.ru/products/1287/review/> (дата обращения: 11.12.2020)
6. Flowvision [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – URL: https://flowvision.ru/images/2014/porosity_308_ru.pdf (дата обращения: 11.12.20)
7. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: учебник для машиностроительных вузов / Т.М. Башпа, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. -4-е изд., стереотипное, перепечатка со второго издания 1982 г. – М: «Издательский дом Альянс», 2010. – 423 с.: ил.
8. Thermalinfo [Электронный ресурс]: [официальный сайт]. – URL: <http://thermalinfo.ru/> (дата обращения: 11.12.20)
9. Климов, А.В. Применение техники с комбинированными энергоустановками (КЭУ) в коммунальном хозяйстве / А.В. Климов, В.В. Кондрашкин // Труды НАМИ. – 2014. – №257. – С.76-82.
10. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с: ил.
11. Карпухин, К.Е. Имитационная модель системы охлаждения в среде Matlab, позволяющая анализировать тепловое состояние аккумуляторного модуля / К.Е. Карпухин, Р.Ш. Биксалеев, Р.Р. Маликов, А.В. Климов // Труды НАМИ. – 2019. – №4. – 61-69.

References

1. Nagaytsev M.V., Eidinov A.A. Elektromobili (Electric vehicles), Moscow, Tipografiya NAMI, 2014, 575p.

2. K.E. Karpukhin, Biksaleev R.Sh., Klimov A.V., Ospanbekov B.K. *Trudy NAMI*, 2017, No. 6(107), pp.26-29.
3. Temperature effect and thermal impact in lithium-ion batteries: A review / S. Ma, M. Jiang, P., Tao, C. Song, J. Wu et al. // *Progress in Natural Science: Material International*. – 2017. – No. 27. – P. 654 – 664.
4. Slabospitsky R.P., Khazhmuradov M.A., Lukyanova V.P. *Radioelektronika I informatika*, 2013, no. 2.
5. URL: <https://ascon.ru/products/1287/review/>
6. URL: https://flowvision.ru/images/2014/porosity_308_ru.pdf
7. Bashta T.M, Rudnev S. S., Nekrasov B. B, etc. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody* (Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic drives), Moscow, «Izdatel'skiy dom Al'yans», 2010, 423 p.
8. URL: <http://thermalinfo.ru/>
9. Klimov A.V., Kondrashkin V.V. *Trudy NAMI*, 2014, no. 257, pp. 76-82
10. Idelchik I.E., Edited by Steinberg M.O. *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* (Handbook of hydraulic resistances), Moscow, Mashinostroyeniye, 1992, 672 p
11. Karpukhin K.E., Biksaleev R.Sh., Malikov R.R., Klimov A.V. *Trudy NAMI*, 2019, no.4, pp.61-69.

Рецензент: М.Ю. Карелина, д-р техн. наук, проф. МАДИ