

Д.О. Маломыжев<sup>1</sup>, Л.В. Демин<sup>1</sup>, Р.И. Устинов<sup>1</sup>, О.В. Мельниченко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация

## АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛОВОГО ТЯГОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СЕРИИ «ЕРМАК»

**Аннотация.** Отечественные электровозы имеют систему принудительного воздушного охлаждения. Данная система предполагает нагнетание воздуха в шахты, в которых установлено силовое тяговое оборудование. Теплоотвод основывается на теплопроводности материала радиатора и корпуса полупроводникового прибора, в свою очередь тепло отводится от тел охлаждающим воздухом, благодаря конвекции и тепловому излучению. Такой способ охлаждения широко применяется на ряде отечественных грузовых электровозов переменного тока: ВЛ80<sup>Т/С</sup>, ВЛ80<sup>Р</sup>, ВЛ85, ВЛ80<sup>ТК/СК/М</sup>, «Ермак» (Э5К, 2ЭС5К, 3ЭС5К), а также пассажирских: ЭП1, ЭП1<sup>М/П</sup>. На данный момент перспективным для исследования и модернизации, является электровоз серии «Ермак», по данной причине будет проанализирована его конструкция и процессы, происходящие во время работы силовых установок. Инструментом для исследования служат САД-системы, которые позволяют построить модель существующей системы охлаждения, а также увидеть тепловые процессы в любом из режимов работы выпрямительно-инверторного преобразователя (ВИП). Адекватность отображаемой информации САД-системой, а именно SolidWorks с пакетом встроенных программа Flow Simulation, подтверждается сравнением аналитического расчёта, по существующим методикам, с тепловой моделью построенной в SolidWorks (Flow Simulation).

**Ключевые слова:** отечественный электровоз, система принудительного воздушного охлаждения, выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП), САД-система, SolidWorks (Flow Simulation), адекватность отображаемой информации.

D.O. Malomyzhev<sup>1</sup>, L.V. Demin<sup>1</sup>, R.I. Ustinov<sup>1</sup>, O.V. Melnichenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Irkutsk State University of Railway Transport, Irkutsk, Russian Federation

## ANALYSIS OF THE COOLING SYSTEM OF POWER TRACTION EQUIPMENT OF DOMESTIC AC ELECTRIC LOCOMOTIVES

**Annotation.** Domestic electric locomotives have a forced air-cooling system. This system involves pumping air into the shafts in which the power traction equipment is installed. The heat sink is based on the thermal conductivity of the material of the radiator and the body of the semiconductor device, in turn, the heat is removed from the bodies by the cooling air, due to convection and thermal radiation. This method of cooling is widely used on a number of domestic freight electric locomotives of alternating current: VL80<sup>T/S</sup>, VL80<sup>R</sup>, VL85, VL80<sup>TK/SK/M</sup>, «Ermak» (E5K, 2ES5K, 3ES5K), as well as passenger: EP1, EP1<sup>M/P</sup>. At the moment, the electric locomotive of the «Ermak» series is promising for research and modernization, for this reason, its design and the processes occurring during the operation of power plants will be analyzed. The research tool is CAD-systems that allow you to build a model of the existing cooling system, as well as to see the thermal processes in any of the modes of operation of the rectifier-inverter converter (RIC). The adequacy of the displayed information by the CAD system, namely, SolidWorks with the integrated Flow Simulation software package, is confirmed by comparing the analytical calculation, according to existing methods, with the thermal model built in SolidWorks (Flow Simulation).

**Keywords:** domestic electric locomotive, forced air cooling system, direct-to-inverter converter, CAD system, SolidWorks (Flow Simulation), adequacy of the displayed information.

### Введение

На сегодняшний день на полигонах: Красноярской, Восточно-Сибирской, Забайкальской железной дороги, эксплуатируются отечественные грузовые электровозы серий: ВЛ80<sup>Т/С</sup>, ВЛ80<sup>Р</sup>, ВЛ85, ВЛ80<sup>ТК/СК/М</sup>, «Ермак» (Э5К, 2ЭС5К, 3ЭС5К), и пассажирские: ЭП1, ЭП1<sup>М/П</sup>. На всех перечисленных сериях электровозов применяется принудительная система воздушного охлаждения силовых тяговых аппаратов и преобразователей.

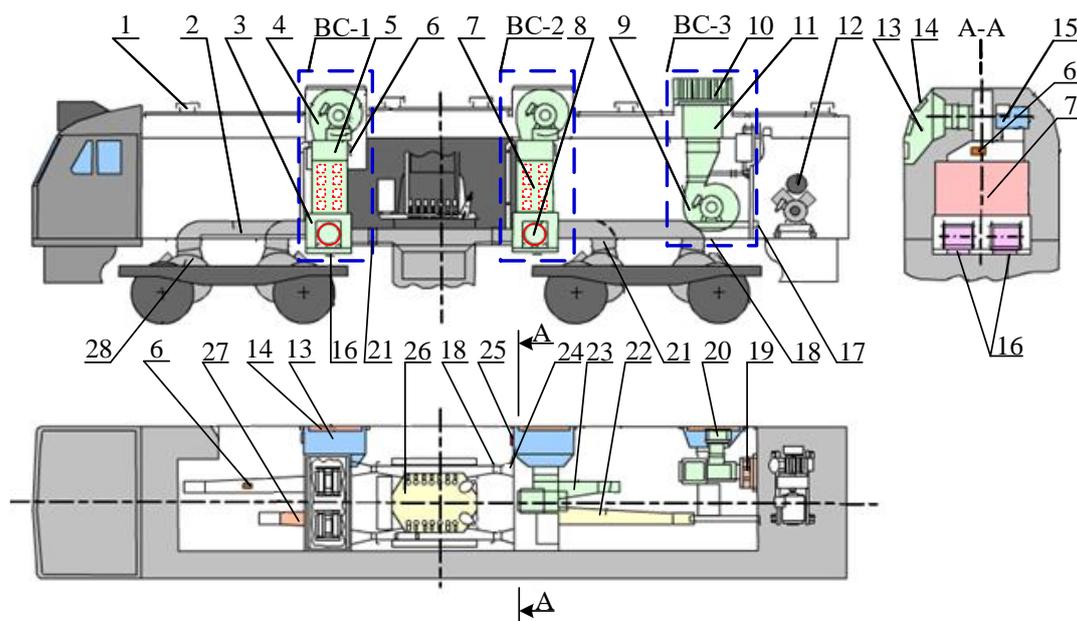
В таблице 1 указано количество единиц электровозов по сериям, с припиской по дирекциям тяги.

**Таблица 1. Количество электровозов по сериям**

Серия электровоза Приписка к дирекции тяги	ВЛ80 <sup>Т/С</sup>	ВЛ80 <sup>Р</sup>	ВЛ85	ВЛ80 <sup>ТК/СК/М</sup>	«Ермак»			ЭП1	ЭП1 <sup>П</sup>
					Э5К	ЭС5К	ЗЭС5К		
Красноярской	6/126	330	1	146/6/3	8	33	194	66	10
Восточно-Сибир- ской	3/7	1	252	–	15	40	141	82	46
Забайкальской	–/1	–	–	–	–	54	503	122	–
<b>Итого:</b>	9/134	331	253	146/6/3	23	127	838	270	56

Электровозы серии ЗЭС5К «Ермак» составляют основу тяговых ресурсов для полигонов железных дорог с системой тягового электроснабжения переменного тока. Согласно программе поставки новых грузовых электровозов переменного тока серии «Ермак» до 2025 г., ежегодно планируется вводить в эксплуатацию не менее 220 секций. С учетом вышесказанного, все технические решения, направленные на совершенствование механического и электрического оборудования, а также повышение эксплуатационных показателей электровозов переменного тока, целесообразно разрабатывать для электровозов серии «Ермак».

Анализ системы вентиляции силового оборудования электровоза переменного тока проведен на примере электровоза серии ЗЭС5К «Ермак» [1]. Схема системы вентиляции представлена на рисунке 1.



1 – дефлектор; 2 – воздуховод к тяговому двигателю (ТД1); 3 – воздухораспределительный короб; 4 – вентилятор ЦВ9-37,6-7,6; 5 – переходной патрубок; 6 – окно выброса воздуха в кузов; 7 – выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП); 8 – сглаживающий реактор (РС); 9 – вентилятор ЦВ9-37,6-7,6; 10 – выбросные жалюзи; 11 – блок балластных резисторов (ББР); 12 – компрессор; 13 – форкамера; 14 – воздухозаборные жалюзи; 15 – приводной двигатель; 16 – окно выброса воздуха от реактора; 17 – окно выброса воздуха в компрессорное помещение; 18 – регулировочная заслонка; 19 – выпрямительная установка возбуждения (ВУВ); 20 – блок диодов; 21 – брезентовый патрубок; 22 – воздуховод к ТД4; 23 – воздуховод к ТД3; 24 – воздуховод к теплообменникам трансформатора; 25 – рециркуляционное окно; 26 – тяговый трансформатор (ТТ); 27 – воздуховод к ТД2; 28 – ТД.

**Рис. 1. Схема системы вентиляции электровоза серии «Ермак»**

Система вентиляции электровоза серии «Ермак» состоит из трех систем вентиляции (ВС1-ВС3), как показано на рис. 1. Системы ВС1 и ВС2 одинаковы, в каждую из них воздух через вертикальные лабиринтные жалюзи и форкамеры забирается центробежными вентиляторами-воздухоочистителями ЦВ 9-37,6-7,6, из переходного патрубка через специальные окна

выбрасывается в кузов, другая подается на охлаждение ВИП. После ВИП воздух поступает в воздухораспределительную камеру, в которой расположены два СР. После охлаждения СР часть воздуха выбрасывается под кузов, а оставшийся по системе воздухопроводов поступает на охлаждение ТД и ТТ, а затем выбрасывается под кузов. Отвод воздуха из системы ВС2 в компрессорное помещение осуществляется через специальный патрубок с заслонкой.

При работе системы ВС3 в режиме рекуперативного торможения воздух засасывается через вертикальные лабиринтные жалюзи и форкамеру через вентилятор Ц9-37,6-7,6 (без устройства пылеотделения). Часть воздуха поступает в ББР по переходной трубе. После охлаждения отработанный воздух выбрасывается в атмосферу через лабиринтные жалюзи, установленные на крыше электровоза. Другая часть по воздухопроводам поступает на охлаждение ВУВ и БД, а затем выбрасывается в кузов.

Система вентиляции обеспечивает номинальные значения нагнетаемого воздуха для охлаждения электрооборудования электровоза, представленные в таблице 2.

**Таблица 2. Потребное количество охлаждаемого воздуха для силового оборудования электровоза**

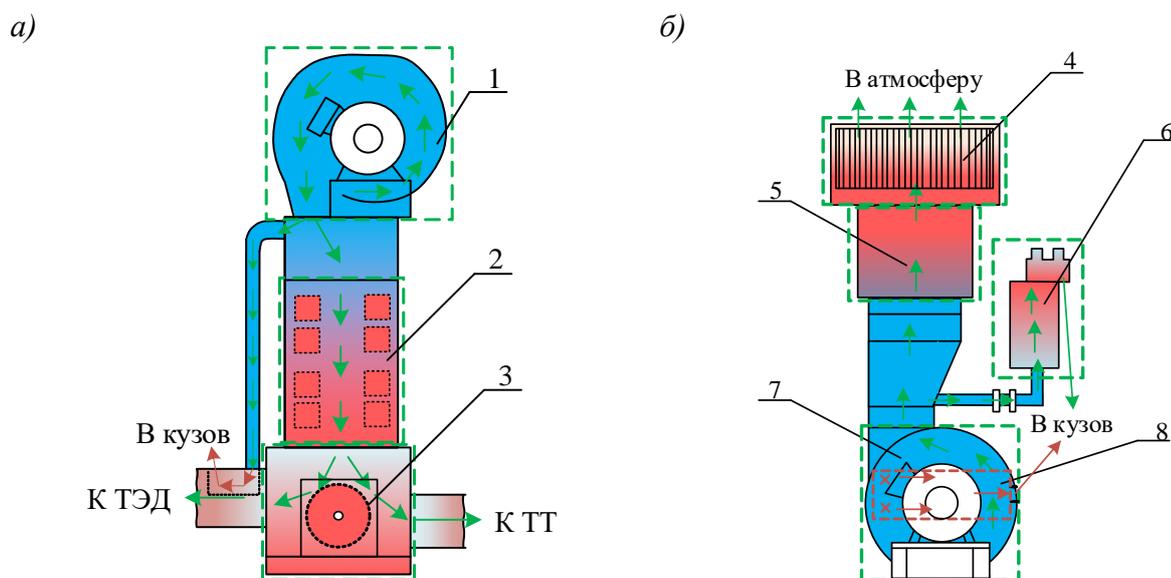
	ВИП	СР	ТТ	ТД	ВУВ	ББР	БД
Номинальное значение расхода воздуха, м <sup>3</sup> /мин	246±5	25±5	90±5	70±5	10±2	250	25±3

Технические характеристики блоков центробежных вентиляторов Ц9-37,6-7,6 и вентиляторов-воздухоочистителей ЦВ9-37,6-7,6, представлены в таблице 3.

**Таблица 3. Технические характеристики вентиляторов Ц9-37,6-7,6 и ЦВ9-37,6-7,6**

Тип вентилятора	ЦВ9-37,6-7,6	Ц9-37,6-7,6
Диаметр рабочего колеса (по концам лопаток), мм	760	760
Номинальная производительность, м <sup>3</sup> /мин	265	225
Полное давление, мПа (кгс/м <sup>2</sup> )	336 (343)	345 (352)
Мощность на валу электродвигателя, кВт	24	20
Эффективность очистки воздуха от снега, %	90	-
КПД максимальный	0,6	0,615
Частота вращения, об/мин	1470	1470

На рис. 2 более подробно показаны системы вентиляции электровоза серии «Ермак».



1 – вентилятор ЦВ9-37,6-7,6; 2 – ВИП; 3 – СР; 4 – выбросные жалюзи; 5 – ББР; 6 – ВУВ; 7 – вентилятор ЦВ9-37,6-7,6; 8 – БД.

**Рис. 2. Схемы систем вентиляции электровоза серии «Ермак»: а) ВС-1 (ВС-2); б) ВС-3**

Система вентиляции ВС-1 (ВС-2) (рис. 2, а) работает следующим образом. Воздух засасывается из атмосферы при помощи центробежного вентилятора 1, объёмный расход воздуха составляет  $246 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Из него воздух разделяется на два потока: в патрубок для создания избыточного давления в кузове; в шахту выпрямительно-инверторного преобразователя 2 с объёмным расходом  $246 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Из неё воздух проходит через сглаживающие реакторы с объёмным расходом  $25 \text{ м}^3/\text{мин}$ , где разделяется на три потока: один к радиатору тягового трансформатора с объёмным расходом  $90 \text{ м}^3/\text{мин}$ ; второй и третий поступает на первую тележку в ТЭД1 и ТЭД2 соответственно, с объёмным расходом  $70 \text{ м}^3/\text{мин}$ .

Система вентиляции ВС-3 (рис. 2, б) работает следующим образом. Воздух засасывается из атмосферы при помощи центробежного вентилятора 4, объёмный расход воздуха составляет  $225 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Из него воздух разделяется на три потока: первый на блок диодов 5 с объёмным расходом  $25 \text{ м}^3/\text{мин}$ , второй на выпрямительную установку возбуждения 3 с объёмным расходом  $10 \text{ м}^3/\text{мин}$ , из них воздух поступает в кузов, для создания избыточного давления внутри него; третий поток поступает на блок балластных резисторов 3 с объёмным расходом  $250 \text{ м}^3/\text{мин}$ , откуда через выбросные жалюзи 1 выбрасывается в атмосферу.

### Построение моделей системы вентиляции электровоза

На данный момент существует множество систем автоматизированного проектирования (CAD систем) таких, как AutoCAD, Autodesk Inventor, SolidWorks, КОМПАС -3D, САТИА и другие. Эти системы отличаются между собой как по функциональности, так и по стоимости. Для проектирования 3D-модели системы вентиляции электровоза была выбрана программа КОМПАС-3D v.18.1, а для моделирования процесса охлаждения силового оборудования, выбрана программа SolidWorks (пакет программ Flow Simulation) [2]. Последний, подходит для решения задач связанных с симуляцией потока, позволяет моделировать потоки жидкости и газа для вычисления рабочих характеристик и возможностей изделия. В данной программе возможно смоделировать реальный процесс нагрева, теплопередачи, сопротивление потоку газа, а также траекторию прохождения газа по шахтам и (или) каналам охлаждения электроустановок.

Моделирование проходило на примере системы вентиляции ВС-1(ВС-2) (рис. 2, а), т.к. она используется постоянного, не зависимо от режима работы электровоза тяга/рекуперация и является наиболее «нагруженной». Спроектированная 3D-модель ВС-1 (ВС-2) выполнена согласно конструкторской документации ЗЭС5К ЗТС.001.012-01и представлена на рис. 3.

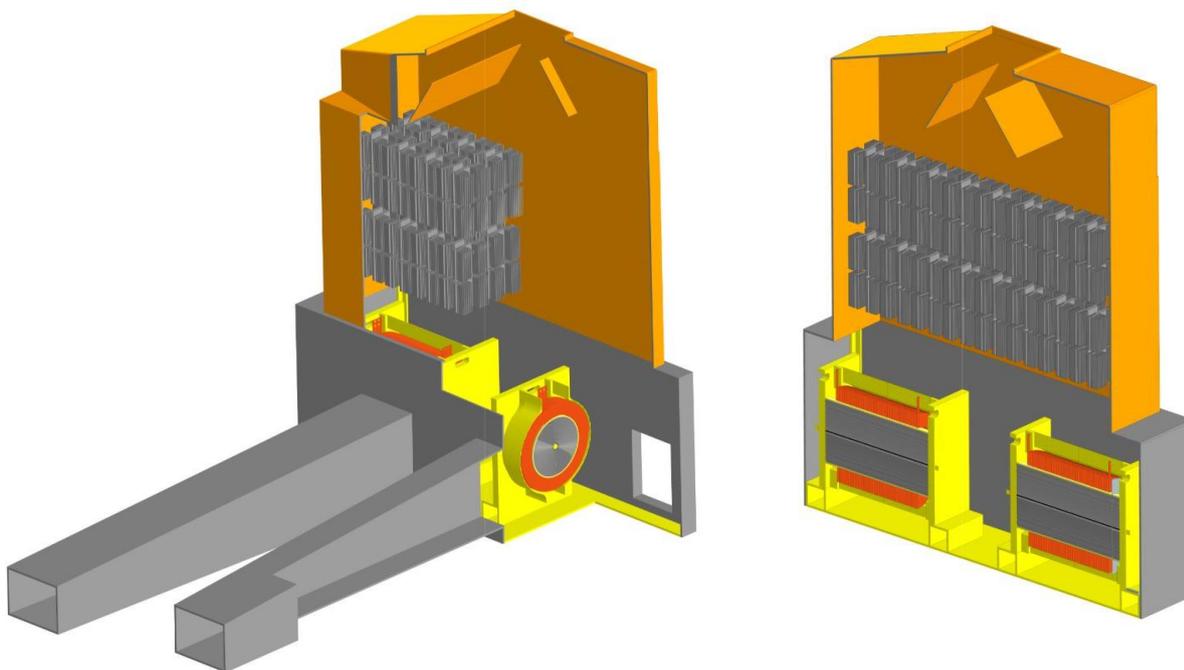


Рис. 3. 3D-модель системы вентиляции ВС-1 (ВС-2) электровоза серии «Ермак»

При моделировании процесса охлаждения силового оборудования (ВИП, СР) рассматривался случай при трогании электровоза с места, с заданным максимально допустимым пусковым током ТД  $I_{Я} = 1200 \text{ А}$ .

Регулирование напряжения на ТД начинается с первой зоны, при этом задействованы тиристорные плечи ВИП VS3-VS6 [3]. Каждое тиристорное плечо состоит из 8 тиристоров Т353-800 [4], подключенных согласно схеме представленной на рис. 4. Величина тока проходящего через тиристорные плечи VS3-VS6 равна:  $2 \times I_{Я} = 2400 \text{ А}$ .

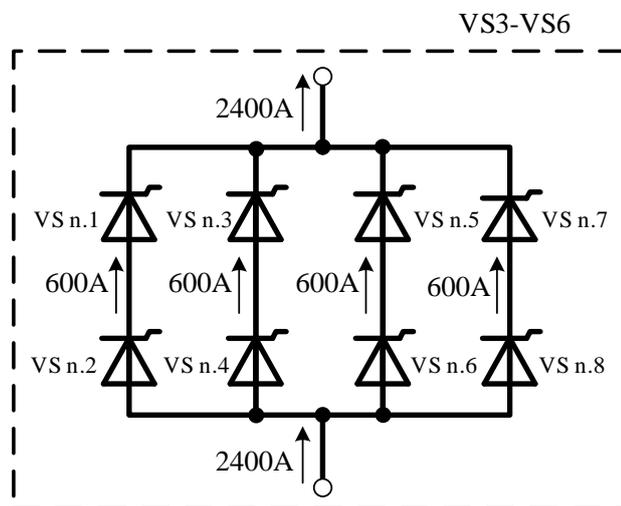


Рис. 4. Принципиальная схема тиристорного плеча

#### Построение тепловой модели

Для проверки адекватности моделирования процесса охлаждения, необходимо построить тепловую модель силового модуля в программе SolidWorks и провести сравнительный анализ с аналитическим расчетом максимальной температуры на границе тиристор-охладитель, по известной методике [5-6].

Рассчитаем мощность электрических потерь в номинальном режиме по формуле:

$$P_{н} = U_{ТО} \cdot I_T + k_{\phi} \cdot r_T \cdot I_T^2, \quad (1)$$

где  $U_{ТО} = 1,12 \text{ В}$  – пороговое напряжение;  
 $I_T = 600 \text{ А}$  – ток, протекающий через вентиль (рис.4);  
 $r_T = 0,000447 \text{ Ом}$  – динамическое сопротивление;  
 $k_{\phi} = 1,94$  – коэффициент формы.

$$P_{н} = 1,12 \cdot 600 + 1,94 \cdot 0,000447 \cdot 600^2 = 984 \text{ Вт.}$$

Определим тепловое сопротивление вентиль-охладитель по формуле:

$$R = R_{пк} + R_{ос} + R_{ко}, \quad (2)$$

где  $R_{пк} = 0,0185 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$  – тепловое сопротивление переход-корпус;  
 $R_{ос} = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$  – установившееся тепловое сопротивление охладитель-среда;  
 $R_{ко} = 0,005 \text{ } ^\circ\text{C/Вт}$  – тепловое сопротивление корпус-охладитель.

$$R = 0,0185 + 0,1 + 0,005 = 0,1235 \text{ } ^\circ\text{C/Вт.}$$

Так как теплоотвод осуществляется двумя охладителями, то отводимая мощность потерь на один охладитель составит  $P_H/2$ , также 20% мощности передаются от корпуса СПП в окружающую среду.

Определим превышение температуры вентиля над температурой окружающей среды по формуле:

$$\theta_H = \frac{P_H \cdot R \cdot 0,8}{2}, \quad (3)$$

$$\theta_H = \frac{P_H \cdot R \cdot 0,8}{2} = \frac{984 \cdot 0,1235 \cdot 0,8}{2} = 48,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Определим температуру вентиля с учётом температуры окружающей среды по формуле:

$$\theta = \theta_c + \theta_H, \quad (4)$$

где  $\theta_c = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$  – температура окружающей среды.

$$\theta = 48,6 + 25 = 73,6 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Данная температура не превышает допустимую в номинальном режиме (менее  $85 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) [4].

Ниже представлены: 3D-модель (рис. 5, а) и тепловая модель (рис. 5, б) силового модуля с тиристором Т353-800 и охладителем О253.

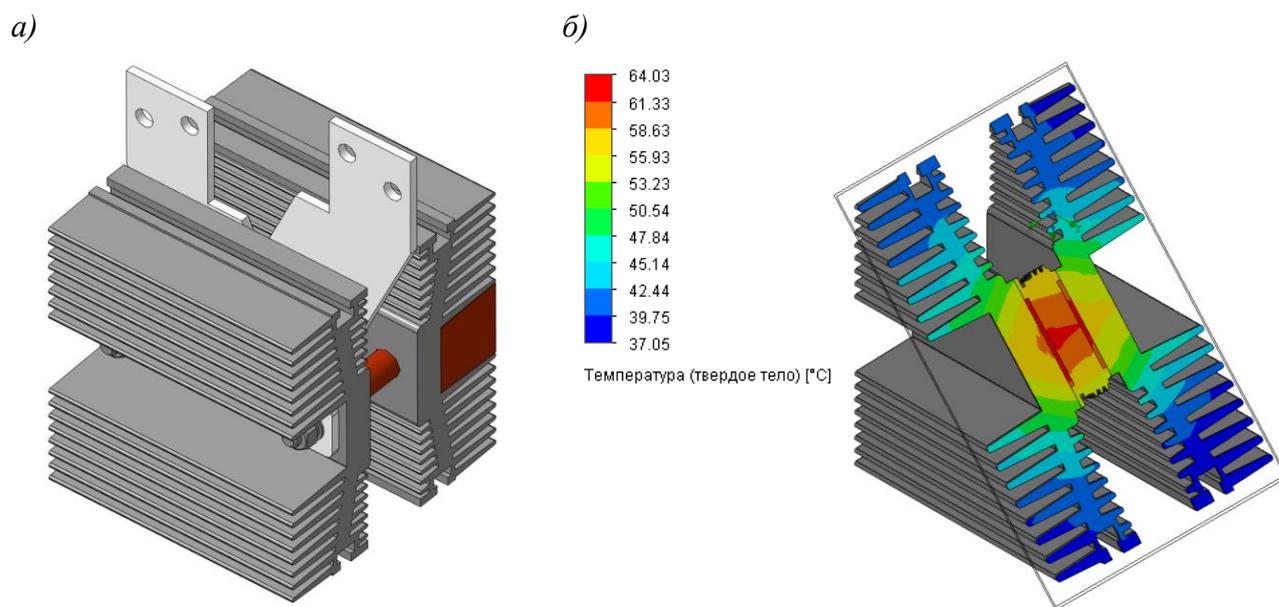


Рис. 5. Модели силового модуля: а) 3D-модель; б) тепловая модель

Как видно из рис. 5 (б) максимальная температура на границе тиристор-охладитель в тепловой модели достигает  $69,3 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

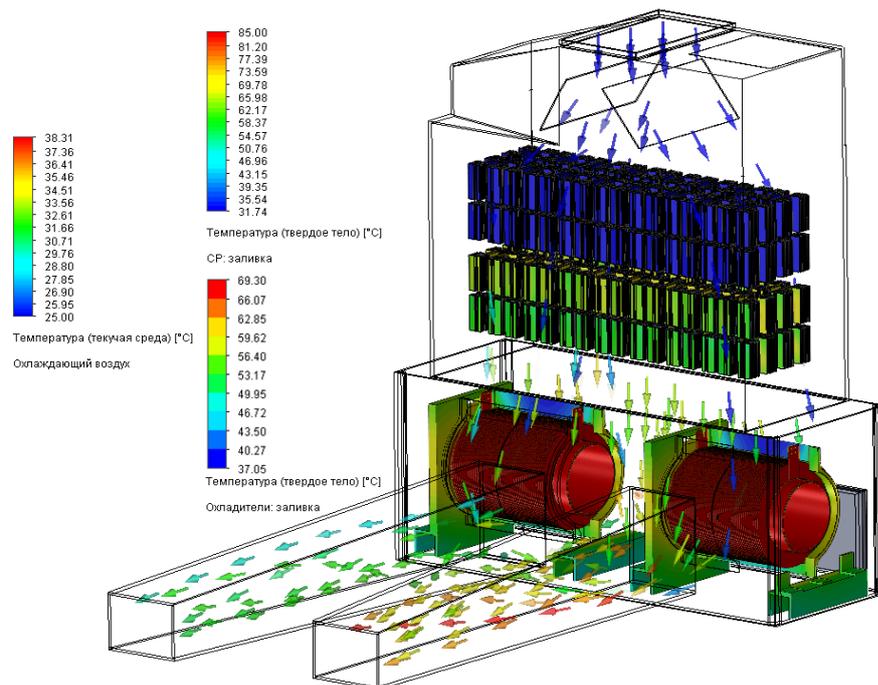
Погрешность между аналитическим расчетом и результатами моделирования не превышает 10%, это подтверждает адекватность разработанной тепловой модели.

#### Моделирования процесса работы системы охлаждения электровоза

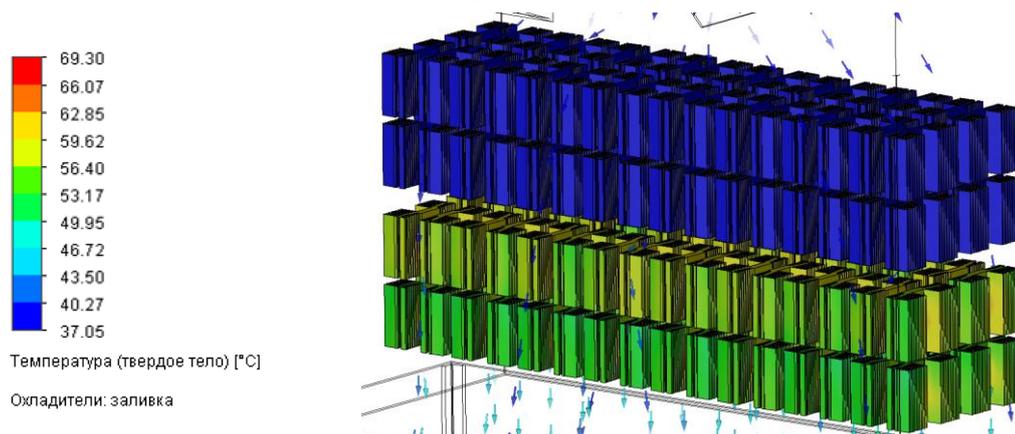
Результаты моделирования процесса охлаждения силового оборудования электровоза ВС-1 (ВС-2) в общем виде (рис. 6, а), ВИП (рис. 6, б) и СР (рис. 6, в).

В результате моделирования нагрева тиристорных блоков и прохождения охлаждающего воздуха через них, наглядно показан процесс охлаждения/нагрева ВИП и СР под максимально допустимой нагрузкой, то есть в режиме трогания на первой зоне регулирования.

a)



б)



в)

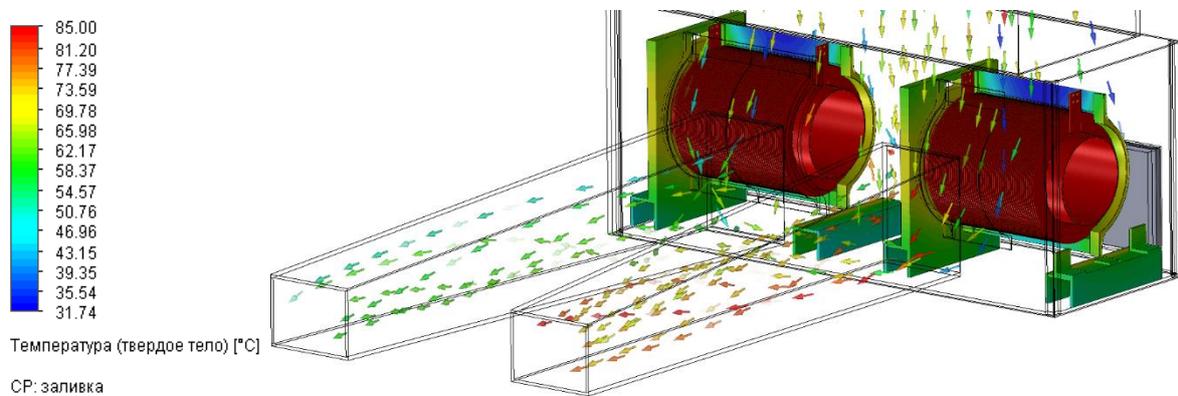


Рис. 6. Результаты моделирования системы вентиляции ВС-1 (ВС-2): а) Результаты моделирования процесса охлаждения силового оборудования электровоза ВС-1 (ВС-2) в общем виде; б) ВИП; в) СР

## Заключение

Разработанная в программе SolidWorks модель, полностью соответствует геометрическим размерам системы вентиляции силового оборудования (ВИП, СР) электровоза серии «Ермак». Расчет максимальной температуры в граничных условиях тиристор-охлаждитель показал, что разработанная модель адекватно рассчитывает и отображает нагрев/охлаждение твердых поверхностей с учетом теплопроводности материалов и геометрических форм. Измеренные и сопоставленные с действительными объемы охлаждающего воздуха в различных частях модели, также подтверждают достоверность протекающих в ней процессов.

Все вышесказанное, говорит о том, что в руках авторов находится современный, виртуальный инструмент, позволяющий глубоко исследовать аэродинамические и тепловые процессы, при охлаждении силового оборудования электровозов серии «Ермак».

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К). Руководство по эксплуатации. Книги 4,5. ЗТС.001.012РЭ2, 2004.
2. SolidWorks (Dasault systemes) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.solidworks.com/ru/domain/smulation>, свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 29.04.2021).
3. Тихменев Б.Н., Кучумов В.А. Электровозы переменного тока с тиристорными преобразователями. - М.: Транспорт, 1988, – 312 с.
4. Тиристор низкочастотный Т-353-800 [Электронный ресурс]. Саранск., 2006 Режим доступа: [http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/tiristory/T353\\_800.pdf](http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/tiristory/T353_800.pdf), свободный. – Загл. с экрана. (дата обращения: 29.04.2021)
5. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника: учебник: в 2 т. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. – 480 с.
6. Исакеев А.И. Эффективные способы охлаждения силовых полупроводниковых приборов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 136 с.

## REFERENCES

1. Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K). User manual. Book 4. ZTS. 001. 012RE2, 2004. - 94 sheets.
2. SolidWorks (Dasault systemes) [Electronic resource – <https://www.solidworks.com/ru/domain/smulation>]. (accessed: 29.04.2021).
3. Tikhmenev B. N., Kuchumov V. A. Electric locomotives of alternating current with thyristor converters. - M.: Transport, 1988 – - 312 p.
4. Low-frequency thyristor T-353-800 [Electronic resource]. Saransk., 2006 Access mode: [http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/tiristory/T353\\_800.pdf](http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/tiristory/T353_800.pdf), free. - Title from the screen.
5. Burkov A. T. Electronics and converting equipment: textbook: in 2 volumes-M.: FGBOU "Educational and Methodological Center for Education in Railway Transport", 2015. - 480 p.
6. Isakeev A. I. Effective methods of cooling power semiconductor devices. - L.: Energoizdat. Leningr. department, 1982 – - 136 p.

## Информация об авторах

*Устинов Роман Иванович* – к.т.н., инженер 1 категории производственно-технического отдела АО «Байкальская ППК», г. Иркутск, e-mail: [romust93@mail.ru](mailto:romust93@mail.ru).

*Маломыжев Дмитрий Олегович* – студент Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [kbprf13@gmail.com](mailto:kbprf13@gmail.com).

*Демин Леонид Владимирович* – студент Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: [dyomin.1998@inbox.ru](mailto:dyomin.1998@inbox.ru).

*Мельниченко Олег Валерьевич* – Д.т.н., профессор, член-корр. Российской инженерной академии, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав», г. Иркутск, e-mail: [olegmelval93@mail.ru](mailto:olegmelval93@mail.ru).

#### **Authors**

*Roman I. Ustinov* – candidate of technical sciences, engineer of the 1st category of the production and technical department of JSC «Baikal PPK», Irkutsk, e-mail: [romust93@mail.ru](mailto:romust93@mail.ru).

*Dmitry O. Malomyzhev* – student of the Irkutsk State University of Railway Transport, Irkutsk, e-mail: [kbprf13@gmail.com](mailto:kbprf13@gmail.com).

*Leonid V. Demin* – student of Irkutsk State University of Railway Transport, Irkutsk, e-mail: [dyomin.1998@inbox.ru](mailto:dyomin.1998@inbox.ru).

*Oleg V. Melnichenko* – doctor of Technical Sciences, Professor, corresponding member. Russian Academy of Engineering, Head of the Department «Electric Rolling Stock», Irkutsk, e-mail: [olegmelval93@mail.ru](mailto:olegmelval93@mail.ru).

#### **Для цитирования**

Д.О. Маломыжев. Анализ системы охлаждения силового тягового оборудования электровоза переменного тока серии «Ермак» [Электронный ресурс] / О.В. Мельниченко, Д.О. Маломыжев, Л.В. Демин, Р.И. Устинов // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. – 2021.

#### **For citation**

D. O. Malomyzhev. Analysis of the cooling system of power traction equipment of an alternating current electric locomotive of the "Ermak" series [Electronic resource] / O. V. Melnichenko, D. O. Malomyzhev, L. V. Demin, R. I. Ustinov // Molodaya nauka Sibiri: electron. scientific journal-2021.