

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА АККУМУЛЯТОРНОГО ШКАФА

*Лежнев Л.Ю., Иванов Д.А., Великорецкий А.А., Некрасов А.С.  
Московский политехнический университет, г. Москва*

**Ключевые слова:** аккумуляторная батарея, тепловыделение, воздушное охлаждение, моделирование, скорость, температура, электровентилятор.

**Аннотация.** В работе представлена методика и результаты моделирования теплового режима аккумуляторного шкафа. Рассматриваемый аккумуляторный шкаф предназначен для размещения аккумуляторных батарей, охлаждения аккумуляторов и для их защиты от неблагоприятного воздействия внешних факторов.

Моделирование теплового режима аккумуляторного шкафа направлено на определение теплового состояния аккумуляторных батарей, а также на оценку эффективности воздушной системы охлаждения и компоновки шкафа в целом. Полученные результаты позволяют определить равномерность скорости движения и температуры воздуха внутри аккумуляторного шкафа и расход воздуха, необходимый для охлаждения батарей. Данные моделирования использованы для уточнения области размещения вентиляторов, размеров и расположения вентиляционных отверстий, а также для уточнения взаимного расположения полок и аккумуляторных модулей внутри шкафа.

Проведенное моделирование на номинальном режиме показало, что максимальная температура аккумуляторной батареи составляет 44,4°C. При этом максимальные температуры балансирующей платы и соединительных шин составили 45°C и 49,4°C соответственно.

В результате моделирования получен необходимый расход воздуха, при котором достигается рабочее температурное состояние аккумуляторных батарей. Так при температуре поступающего воздуха 25 °C необходимый расход воздуха составляет 224,3м<sup>3</sup>/ч.

По итогам моделирования установлено, что существующая конструкция аккумуляторного шкафа не требует доработок в виде дополнительных экранов для регулирования направления потоков охлаждающего воздуха. Полученные результаты показали, что принятое расположение полок и аккумуляторных модулей не препятствует движению воздуха внутри шкафа.

## SIMULATION OF THE THERMAL MODE OF THE BATTERY CABINET

*Lezhnev L.Yu., Ivanov D.A., Velikoretskiy A.A., Nekrasov A.S.  
Moscow Polytechnic University, Moscow*

**Keywords:** battery, heat dissipation, air cooling, simulation, speed, temperature, electric fan.

**Abstract.** The paper presents the methodology and results of modeling the thermal regime of the battery Cabinet. The battery Cabinet in question is designed to accommodate batteries, cool the batteries and protect them from the adverse effects of external factors. Simulation of the thermal regime of the battery Cabinet is aimed at determining the thermal state of the batteries, as well as to assess the efficiency of the air cooling system and the layout of the Cabinet as a whole. The results obtained allow us to determine the uniformity of the speed and temperature of the air inside the battery Cabinet and the air flow required for cooling the batteries. The simulation data are used to clarify the area of placement of fans, the size and location of ventilation holes, as well as to clarify the relative location of shelves and battery modules inside the Cabinet. The simulation carried out on the nominal mode showed that the maximum temperature of the battery is 44.4°C. at the same time, the maximum temperatures of the balancing Board and connecting buses were 45°C and 49.4°C, respectively. As a result of the simulation, the necessary air flow is obtained, at which the operating

temperature state of the batteries is achieved. Thus, at an incoming air temperature of 25°C, the required air flow rate is 224.3m<sup>3</sup>/h. Based on the results of the simulation, it was found that the existing design of the battery Cabinet does not require modifications in the form of additional screens to regulate the direction of cooling air flows. The results showed that the accepted arrangement of shelves and battery modules does not interfere with the movement of air inside the Cabinet.

## **Введение**

### *Проблематика*

1) Особенностью литий-ионных аккумуляторных батарей является выделение тепла во время их работы и наличие верхней границы рабочей температуры.

Это приводит к необходимости создания специальных аккумуляторных шкафов, предназначенных для размещения АКБ, охлаждения аккумуляторов и для их защиты от неблагоприятного воздействия внешних факторов [1].

Также следует отметить тренд использования литиевых батарей в составе различных накопителей энергии, в том числе промышленного назначения [2-7], где также остро стоит вопрос их вентиляции и охлаждения.

2) Также существует необходимость в повышении надежности, упрощении конструкции и снижении массы аккумуляторных шкафов.

3) Другим важным аспектом является сокращение времени и повышение точности моделирования, проводимого для изучения теплового состояния аккумуляторных батарей.

При этом необходимо получить подробные расчетные данные, позволяющие оценить параметры системы охлаждения, температурный режим аккумуляторных батарей и прочих элементов, входящих в состав аккумуляторного шкафа.

### *Актуальность*

Актуальность проведенного моделирования теплового режима аккумуляторного шкафа, а также систем хранения АКБ, электрических буферных устройств или буферных накопителей энергии, подтверждается следующими тенденциями:

1) Стремление к повышению удельной мощности аккумуляторного шкафа, что приводит к увеличению выделяемой тепловой мощности на единицу объема [8].

2) Снижение габаритных размеров аккумуляторного шкафа, при котором возрастают требования к системе охлаждения.

3) Для повышения эффективности аккумуляторного шкафа необходимо снижение затрат на привод электроклапанов, входящих в состав системы охлаждения.

Перечисленные тенденции подтверждают актуальность проведенного моделирования теплового режима аккумуляторного шкафа.

## **Методика**

### *Постановка задачи*

В результате проведения моделирования теплового режима аккумуляторного шкафа требуется определить и установить следующие параметры:

- объемная и поверхностная температура аккумуляторных батарей;
- равномерность скорости движения и температуры воздуха внутри аккумуляторного шкафа;
- расход воздуха, необходимый для охлаждения батарей;
- уточнить область размещения вентиляторов;
- уточнить размеры и расположение вентиляционных отверстий;
- уточнить взаимное расположение полок и аккумуляторных модулей внутри шкафа.

Для моделирования теплового режима аккумуляторного шкафа проводится CFD-моделирование в программной среде Solidworks с использованием дополнения Flow Simulation, которое позволяет рассчитать тепловое состояние аккумуляторных батарей и соединительных шин, параметры и траекторию движения воздуха внутри аккумуляторного шкафа, а также определить необходимые характеристики электровентилятора, используемого для принудительной циркуляции воздуха. Целесообразность и эффективность применения Flow Simulation для решения задач теплообмена между твердыми телами и текучими средами подтверждена выполненными работами [9-11].

Исходные данные для моделирования формируются по результатам проведения предварительных аналитических расчетов, по результатам которых определяются основные геометрические параметры аккумуляторного шкафа, размеры и расположение вентиляционных отверстий и каналов, область размещения вентиляторов, а также взаимное расположение полок и аккумуляторных модулей внутри шкафа.

Поскольку моделирование теплового режима аккумуляторного шкафа предполагает решение задачи, связанной с теплообменом между твердой и воздушной средой, то происходит деление твердотельной модели шкафа на 2 типа расчетных ячеек: твердое тело и жидкость. При этом для повышения точности расчета и снижения расчетного времени выполняется оптимизация расчетной сетки. Например, происходит уменьшение расчетных ячеек в узких каналах и увеличение размера ячеек в тех областях, для которых уплотнение сетки не требуется.

Задаются конструкционные материалы каждого компонента, входящего в состав аккумуляторных батарей и шкафа. В процессе моделирования используются свойства материалов, среди которых плотность, теплоемкость, теплопроводность и пр.

Задается входное отверстие, используемое для подачи охлаждающего воздуха, и выходное отверстие, предназначенное для отвода подогретого воздуха.

На этом этапе назначаются объемные и поверхностные источники тепловой мощности. В аккумуляторном шкафу имеется несколько источников тепловой мощности:

- аккумуляторные батареи, каждая из которых имеет тепловыделение 36Вт на номинальном режиме;
- балансировочные платы (плата СКУ МА - системы контроля и управления, модуль аккумулятора) с тепловыделением каждой 13,6Вт;

- соединительные медные шины, используемые в составе каждой группы из 18 аккумуляторов, расположенных на четырех полках, имеют объемное тепловыделение  $197778 \text{ Вт/м}^3$ . Медные шины, применяемые для последовательного соединения четырех групп аккумуляторов, имеют объемное тепловыделение  $71200 \text{ Вт/м}^3$ .

Для проведения моделирования приняты следующие допущения:

- 1) весь объем АКБ является источником тепловой мощности;
- 2) теплообмен между сопрягаемыми элементами принимается идеальным;
- 3) в качестве источника тепловой мощности, производимой балансировочными платами, выбраны две поверхности аккумуляторов, расположенные под клеммами и имеющие тепловыделение  $6,8 \text{ Вт}$  каждая. Это сделано для упрощения сборки с целью значительного сокращения расчетных ячеек и продолжительности расчета.

#### *Краткое описание конструкции аккумуляторного шкафа*

Внутри аккумуляторного шкафа находится 4 полки, расположенные друг над другом. На каждой полке находится модуль аккумуляторов, который состоит из 18 последовательно соединенных аккумуляторных батарей. Всего в аккумуляторном шкафу расположено 4 модулей, которые имеют последовательное соединение.

Каждая полка изготовлена из перфорированных реек, за счет чего происходит более свободная циркуляция охлаждающего воздуха. Движение воздуха между аккумуляторами, установленными вплотную, происходит через канавки, выполненные на боковых поверхностях пластиковых корпусов аккумуляторов.

На рисунке 1 показана упрощенная 3D-модель аккумуляторного шкафа, используемая для моделирования его теплового режима.



Рис. 1. 3D-модель аккумуляторного шкафа

Аккумуляторный шкаф оснащен воздушной системой охлаждения, основными функциями которой является отвод тепла, выделяемого при работе аккумуляторных батарей. Это необходимо для обеспечения рабочей температуры АКБ и прочих компонентов на режиме максимальной мощности (на номинальном режиме). Также система охлаждения используется для обеспечения равномерного распределения температуры аккумуляторных батарей с отклонением не более 5°C.

Воздушная система охлаждения устроена следующим образом. Внутри аккумуляторного шкафа организована циркуляция воздуха за счет естественной конвекции и принудительной подачи воздуха с помощью электровентилятора. Холодный воздух поступает в шкаф через отверстия, расположенные снизу, а отвод нагретого воздуха происходит через отверстия в верхней части шкафа.

Исходные данные для моделирования теплового режима аккумуляторного шкафа представлены в таблице 1.

Табл. 1. Исходные данные для моделирования теплового режима аккумуляторного шкафа

Параметр	Размерность	Значение
Тепловыделение аккумуляторной батареи	Вт	36
Тепловыделение балансирующей платы	Вт	13,6
Удельное тепловыделение медной шины, используемой для соединения аккумуляторных батарей	Вт/м <sup>3</sup>	197778
Удельное тепловыделение медной шины, используемой для соединения модулей аккумуляторов	Вт/м <sup>3</sup>	71200
Температура охлаждающего воздуха на входе в шкаф	°С	25
Максимальная температура аккумуляторной батареи	°С	45

### Результаты

По итогам проведения моделирования теплового режима аккумуляторного шкафа получены необходимые результаты, позволяющие проанализировать температуры аккумуляторных батарей, эффективность компоновки и системы охлаждения шкафа.

На рисунках 2, 3 и 4 в качестве результатов моделирования показаны сечения с распределением скорости охлаждающего воздуха, температур аккумуляторных батарей и воздуха, сделанные в среднем сечении аккумуляторных модулей.

На рисунке 2 представлено сечение с распределением температуры аккумуляторных батарей. Использована температурная шкала с максимальным значением 320 К.

На рисунке 3 показано сечение с распределением температуры охлаждающего воздуха внутри аккумуляторного шкафа, в котором использована температурная шкала с максимальным значением 315 К.

На рисунке 4 показано сечение с распределением скорости охлаждающего воздуха внутри аккумуляторного шкафа.

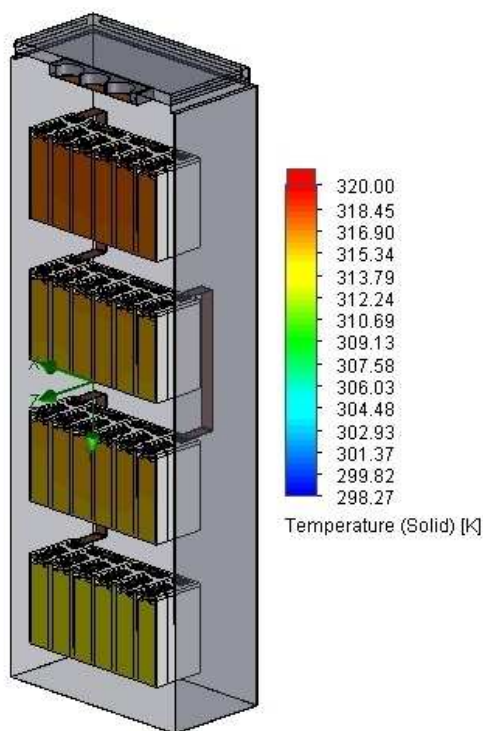


Рис. 2. Распределение температуры аккумуляторных батарей

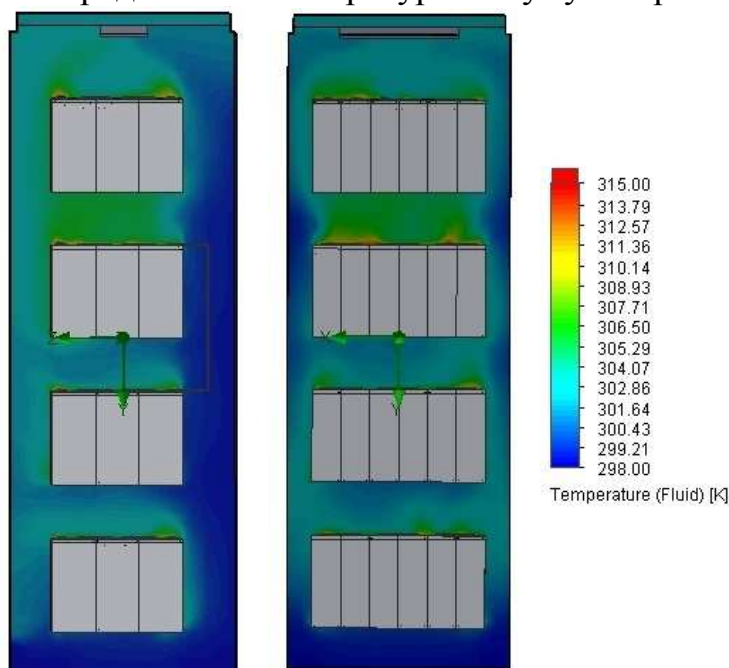


Рис. 3. Распределение температуры охлаждающего воздуха

На рисунке 5 показана диаграмма с траекториями движения потока охлаждающего воздуха внутри аккумуляторного шкафа.

Заметим, что для получения более наглядной картины максимальные значения в шкалах со скоростью воздуха были намеренно ограничены на уровне 0,5 м/с (рисунок 4) и 1 м/с (рисунок 5). При этом максимальная скорость воздуха в сечении впускного отверстия достигает 0,942 м/с, а в области электровентиляторов составляет 3 м/с.

Результаты моделирования теплового режима аккумуляторного шкафа представлены в таблице 2.

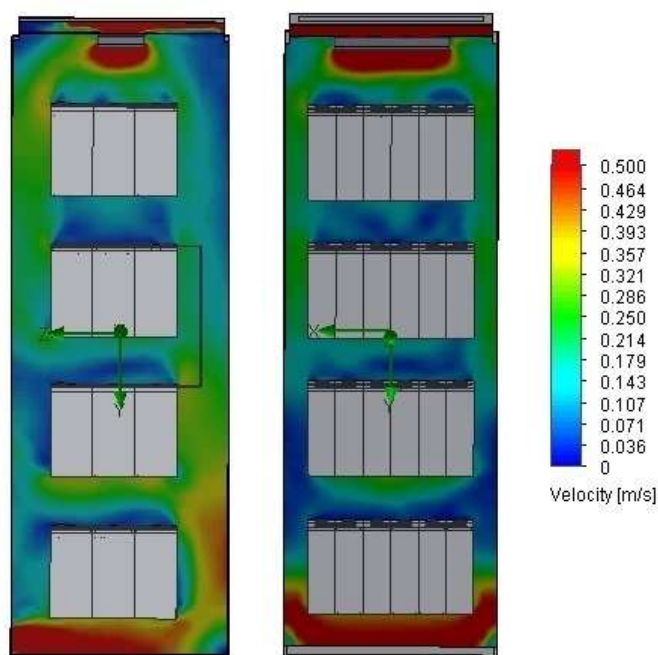


Рис. 4. Распределение скорости охлаждающего воздуха

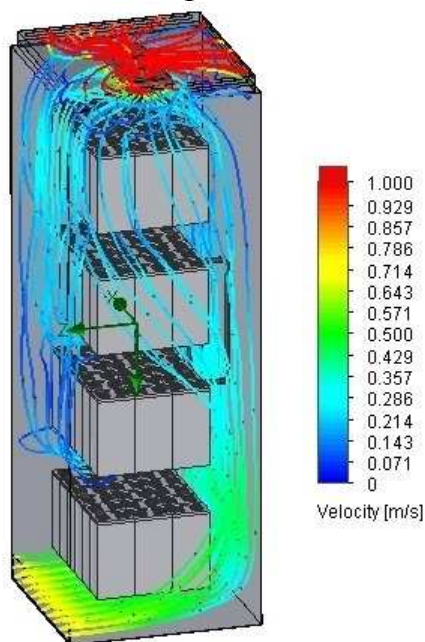


Рис. 5. Траектории движения потока охлаждающего воздуха

Табл. 2. Результаты моделирования теплового режима аккумуляторного шкафа

Параметр	Значение
Максимальная температура аккумуляторов, °С:	
1 уровень	40,6
2 уровень	42,8
3 уровень	43
4 уровень	44,4
Максимальная температура шин модулей, °С	
49,4	
Необходимый расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	224,3

## Обсуждение

Проведенное моделирование теплового режима аккумуляторного шкафа позволило получить данные, необходимые для определения теплового состояния аккумуляторных батарей, а также для оценки эффективности воздушной системы охлаждения и компоновки шкафа в целом.

1) Данные по температурам внутреннего объема и поверхности АКБ позволили установить локальные максимумы температур и выявить расположение аккумуляторов, температура которых может превышать рабочие значения. Это имеет большое значение, учитывая плотное размещение батарей в аккумуляторном модуле.

2) Выполнена визуализация потоков охлаждающего воздуха, которая является удобным и наглядным инструментом для анализа расположения полок внутри аккумуляторного шкафа и размещения АКБ на полках. Визуализация использована для оценки качества движения охлаждающего воздуха и позволяет определить возможные пути совершенствования компоновки аккумуляторного шкафа.

3) В аккумуляторном шкафу организована естественная конвекция воздуха, что стало возможным при подаче холодного воздуха через отверстия, расположенные в нижней части шкафа.

Такое решение является эффективным дополнением к принудительной циркуляции воздуха и повышает производительность системы охлаждения.

4) В результате моделирования определены температуры соединительных шин на номинальном режиме работы. Также было скорректировано их расположение относительно АКБ и стенок шкафа.

Соединительные шины не должны препятствовать движению воздуха и не располагаться вплотную к аккумуляторным батареям, чтобы избежать их дополнительного нагрева.

5) В процессе моделирования проверены некоторые технические решения в конструкции аккумуляторного шкафа, к которым относятся расположение и площадь проходного сечения отверстий для подачи и отвода охлаждающего воздуха.

Так предложенное в 3D-модели (рисунок 1) расположение отверстий обеспечивает достаточную равномерность распределения воздуха внутри шкафа, а принятая площадь проходного сечения не создает высокого аэродинамического сопротивления.

## Выводы

Проведенное моделирование теплового состояния аккумуляторного шкафа позволило утвердить его компоновку и принятые конструктивные решения.

1) По итогам моделирования подтверждена работоспособность используемой системы охлаждения, которая обеспечивает необходимый температурный режим аккумуляторных батарей при работе на номинальном режиме. Максимальная температура аккумуляторной батареи, расположенной на 4 уровне, составляет 44,4°C.

2) В результате визуализации потоков охлаждающего воздуха установлено, что существующая конструкция аккумуляторного шкафа не требует доработок,



например, в виде дополнительных экранов и прочих элементов, предназначенных для регулирования направления потоков охлаждающего воздуха.

3) Полученные результаты показывают, что принятое расположение полок и аккумуляторных модулей не препятствует движению воздуха внутри шкафа. Установлено, что в существующей компоновке шкафа количество областей с заторможенным воздухом находится на допустимом уровне и это не ухудшает эффективность охлаждения.

4) В результате проведенного моделирования определена максимальная температура балансировочной платы на номинальном режиме работы, которая составила 45°C. Полученная максимальная температура соединительных шин на номинальном режиме не превысила 49,4°C.

5) Расход охлаждающего воздуха через аккумуляторный шкаф определяется расходными характеристиками электроventилятора. В результате моделирования получен необходимый расход воздуха, при котором достигается рабочее температурное состояние аккумуляторных батарей. Так при температуре поступающего воздуха 25°C необходимый расход воздуха составляет 224,3 м<sup>3</sup>/ч.

Настоящая работа подготовлена в рамках соглашения № 14.574.21.0153 от «26» сентября 2017 года о предоставлении субсидии при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57417X0153.

#### Список литературы

1. <https://www.power-solutions.com/industry-trends-best-practices/industry-trends/benefits-lithium-ion-batteries-versus-vrla-batteries>
2. Шустров Ф.А. К вопросу о внедрении комплексов быстрой зарядки электромобилей на АЗС / Ф.А. Шустров, Н.А. Хрипач, Р.В. Стуколкин // Актуальные направления научных исследований: перспективы развития: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2019. – С. 59-63. – DOI: 10.21661/r-497850.
3. Хрипач Н.А. Сетевые накопители энергии как инструмент расширения функционала энергосистемы / Н.А. Хрипач, В.Г. Чиркин, Ф.А. Шустров, А.С. Некрасов // Новое слово в науке: стратегии развития: материалы V Междунар. науч.-практ. конф. – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2018. – С. 183-186. –DOI: 10.21661/r-472188.
4. Чиркин В.Г. Гибридный накопитель энергии на базе аккумуляторов и суперконденсаторов для применения в локальных и изолированных электросетях / В.Г. Чиркин, Б.А. Папкин, Р.В. Стуколкин // Промышленность, сельское хозяйство, энергетика, инфраструктура: проблемы и векторы развития: сборник научных трудов по материалам II Международной научно-практической конференции. – М.: Профессиональная наука, 2018. – С. 5-9.
5. Chirkin V.G., Petrichenko D.A., Lezhnev L.Yu., Khripach N.A., Shustrov F.A. Development of Hybrid Network Energy Storage. Part 1: Embodiment // International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2018, vol. 9(9), pp. 1577-1563.
6. Chirkin V.G., Khripach N.A., Petrichenko D.A., Papkin B.A. Review of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System Schemes for Power Systems Applications // International Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2017, vol. 8(10), pp. 699-707.
7. Khripach N.A., Shustrov F.A., Chirkin V.G., Papkin I.A., and Stukolkin R.V. Hybrid Energy Storage Devices for Rapid Charge Stations of Electric Vehicles // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, vol. 8(7), 2019, pp. 2239-2244.
8. Guangming L., Minggao O., Languang L., Jianqiu Li J., Xuebing H. (2014). Analysis of the heat generation of lithium-ion battery during charging and discharging considering different

- influencing factors // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 116. 10.1007/s10973-013-3599-9.
9. Khripach N.A., Papkin B.A., Korotkov V.S., Zaletov D.V. (2015). Study of the influence of heat exchanger body design parameters on the performance of a thermoelectric generator for automotive internal combustion engine // Biosciences, Biotechnology Research Asia. 12. 677-689. 10.13005/bbra/2084.
  10. Khripach N.A., Korotkov V.S., Papkin I.A. (2017). Thermoelectric cooling radiator for internal combustion engine // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 8. 668-675.
  11. Khripach N.A., Ivanov D.A., Tatarnikov A.P., Papkin B.A.. (2019). Turbogenerator: Designing and layout development // International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD), ISSN (P): 2249-6890; ISSN (E): 2249-8001, Vol. 9, Issue 3, Jun 2019, 1625-1634.

Сведения об авторах:

*Лежнев Лев Юрьевич* – к.т.н., начальник НТЦ «Силовые агрегаты», Московский политех, г.Москва;

*Иванов Денис Алексеевич* – ведущий инженер НТЦ «Силовые агрегаты», Московский политех, г.Москва;

*Великорецкий Александр Александрович* – ведущий инженер НТЦ «Силовые агрегаты», Московский политех, г.Москва;

*Некрасов Александр Викторович* – ведущий инженер НТЦ «Силовые агрегаты», Московский политех, г.Москва.