

УДК 621.3.036.213

**ВЫБОР ЭФФЕКТИВНОЙ КОНСТРУКЦИИ ВЫЕМНОГО МОДУЛЯ
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА
ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА****Марейченко Иван Вячеславович,**заместитель директора ГБУ «НИИВЭ»,
Россия, г. Донецк, niive@list.ru**Поважнюк Андрей Николаевич,**заведующий сектором НИОАЭиЭУ, ГБУ «НИИВЭ»,
Россия, г. Донецк, niive@list.ru**Дьяченко Андрей Иванович,**младший научный сотрудник НИОАЭиЭУ, ГБУ «НИИВЭ»,
Россия, г. Донецк, niive@list.ru**Аннотация**

Выполнено обоснование практической реализуемости преобразовательного модуля очистного комбайна с неподвижным жидкостноохлаждаемым охладителем и выемного силового электронного модуля, осуществляющие теплообмен разъемным соединением без применения термопаст. Результатом анализа определена оптимальная конфигурация сопряжения охладителя и монтажной панели конструкция «ласточкин хвост».

Ключевые слова: преобразователь частоты, очистной комбайн, тепловое моделирование, тепловое сопротивление, силовой электронный модуль.

**SELECTING AN EFFICIENT DESIGN OF A REMOVABLE MODULE OF A
SEMICONDUCTOR CONVERTER DEVICE OF A CLEANING MILL****Mareychenko Ivan Vyacheslavovich,**Deputy Director of the State Budgetary Institution "NIIVE",
Russia, Donetsk, niive@list.ru**Povazhnyuk Andrey Nikolaevich,**Head of Sector, RDAEDaESD, NIIVE,
Russia, Donetsk, niive@list.ru**Dyachenko Andrey Ivanovich,**Junior Researcher, RDAEDaESD, NIIVE,
Russia, Donetsk, niive@list.ru

ABSTRACT

The substantiation of the practical feasibility of a converter module of a cutting machine with a fixed liquid-cooled cooler and a removable power electronic modules that perform heat exchange by means of a detachable connection without the use of thermal pastes. The analysis results in the determination of the optimal configuration for coupling the cooler and the mounting panel, a dovetail design.

Keywords: frequency converter, shearer, thermal modeling, thermal resistance, power electronic module.

Современные тенденции развития горного машиностроения предусматривают расширение сферы применения регулируемых электрических приводов переменного тока, особенно в очистных комбайнах, где такие устройства могут успешно выполнять функцию обеспечения регулируемой скорости движения выемочной машины в очистном забое. К настоящему моменту таким функционалом обладают как добычные угольные комбайны флагманов зарубежного горного машиностроения (Eickhoff (Германия), JOY (США), Famur (Польша), T-Machinery (Чехия)) [1], так и разрабатываемая ГБУ «ДОНУГЛЕМАШ» отечественная выемочная техника [2], в том числе и новый проектируемый перспективный очистной комбайн КДК1000.

Учитывая сложные условия применения очистного оборудования, характеризуемых высоким уровнем вибрационных и ударных нагрузок, влажностью и запыленностью среды, ограниченностью свободного объема для размещения электрического оборудования в корпусе комбайна, высокими требованиями к отказоустойчивости и надежности оборудования [3] основной задачей при разработке полупроводникового преобразовательного устройства переменного тока привода подачи комбайна является разработка компактной легкообслуживаемой и ремонтпригодной электротехнической конструкции с эффективной системой жидкостного охлаждения. В проекте создания комплектного устройства управления для привода подачи очистного комбайна КДК1000 решение данной задачи видится в разработке конструкции преобразовательного модуля, отвечающего следующим требованиям:

- система охлаждения которого исключает ввод охлаждающей жидкости внутрь взрывозащищенного корпуса энергоблока комбайна;
- быстрая заменяемость и модульность конструкции, минимизирующая время простоя горной машины.

Традиционное решение проблемы отвода тепловых потерь от преобразовательных устройств состоит в обеспечении минимального теплового сопротивления от источника тепла (кристалла полупроводникового модуля) и охладителем, соответственно, жесткой стационарной конструкции узла сопряжения контактирующих тел [4-7]. Для этого применяют следующие методы:

- использование в конструкции материалов с низким температурным сопротивлением;
- уменьшение шероховатостей сопрягаемых поверхностей;
- заполнение пустот между сопрягаемыми телами лучшей теплопроводностью (термопасты);
- создание контактного давления между контактирующими телами сопрягаемых поверхностей.

В решении текущей прикладной задачи эти методы применимы не в полной мере и ранее не рассматривались.

Целью данного исследования является обоснование возможности реализации и конструктивного исполнения подвижной выемной конструкции полупроводникового преобразовательного модуля очистного комбайна. Применение термораст крайне нежелательно в запыленных средах, поскольку пасты становятся «сборщиками» пыли за счет своих физико-химических свойств. Соответственно, выполнить техническое обслуживание или замену компонентов такого оборудования в условиях горного предприятия, особенно при его значительных размерах оборудования и его массе, трудоемко, поскольку невозможно исключить попадание твердых частиц в места обеспечения теплового контакта. Твердые частицы, попав в плоскость соприкосновения, значительно ухудшают теплоотдачу, что может привести к аварийным режимам работы электрооборудования.

Методология исследования состоит в моделировании в среде Solidworks с пакетом Flow simulation тепловых процессов в сопрягаемых узлах и поверхностях системы охлаждения разрабатываемого комплектного устройства управления электродвигателем подачи очистного комбайна применительно к задаваемым условиям эксплуатации (температура, давление и расход охлаждающей жидкости) и параметрам конструктивного решения отдельных элементов этой конструкции (тип сопрягаемой поверхности, величина площади соприкосновения, чистота обработки поверхностей).

Ход исследования включал в себя следующие этапы:

- определения минимально допустимых размеров плиты для размещения охлаждаемых полупроводниковых компонентов и определение величины их тепловых потерь исходя из принятой схемы преобразовательного устройства;
- разработка принципиальных конструктивных решений сопрягаемых поверхностей и определение их конструктивных параметров;
- подбор возможных материалов в узлах исследуемой конструкции;
- анализ влияния зазоров в сопрягаемых поверхностях в качестве эффективности работы системы охлаждения;
- исследование влияния шероховатости сопрягаемых поверхностей на эффективность работы системы охлаждения;
- выбор оптимального конструктивного исполнения и технических требований к деталям сопрягаемых поверхностей выемного силового полупроводникового устройства.

В соответствии с техническими требованиями к разрабатываемому комплектному устройству управления предусмотрено применение в качестве охлаждающей жидкости шахтной воды с содержанием взвешенных частиц не более 1000 мг/м³, показателем кислотности рН-6-9,5, давлением до 3 МПа и температурой от плюс 1°С до плюс 35 °С. Температура окружающей среды от плюс 1°С до плюс 35°С. Номинальные значения механических внешних воздействующих факторов по ГОСТ17516.1-90 для группы механического исполнения М35. Номинальные значения климатических факторов по ГОСТ15150-69 и ГОСТ15543.1-89 при верхнем значении относительной влажности воздуха (98±2) % с конденсацией влаги при температуре плюс 35°С.

Минимальный габаритный размер охладителя определяется размерами используемых полупроводниковых модулей по принятой трехуровневой силовой схеме рекуперативного преобразователя частоты с фиксирующими диодами, построенной на двенадцати IGBT модулях MIAA-HB17SA-200N.5 и шести диодах МДЗ-245-18-F.5 с характеристиками [8] и [9]. Тепловые потери полупроводниковых приборов такой схемы определены по [10] и составили 600 Вт для одного IGBT модуля и 80 Вт для каждого фиксирующего диода.

На основании вышеизложенных требований для выполнения теплового моделирования в среде Solidworks [11] была построена 3d модель (рис. 1, 2) охлаждающей плиты 1 и монтажная панель 2 с размещёнными на ней IGBT 3 и диодными 4 модулями. Для подачи охлаждающей жидкости (воды) в охлаждающей плите предусмотрены вводное 5 и выходное 6 отверстие.

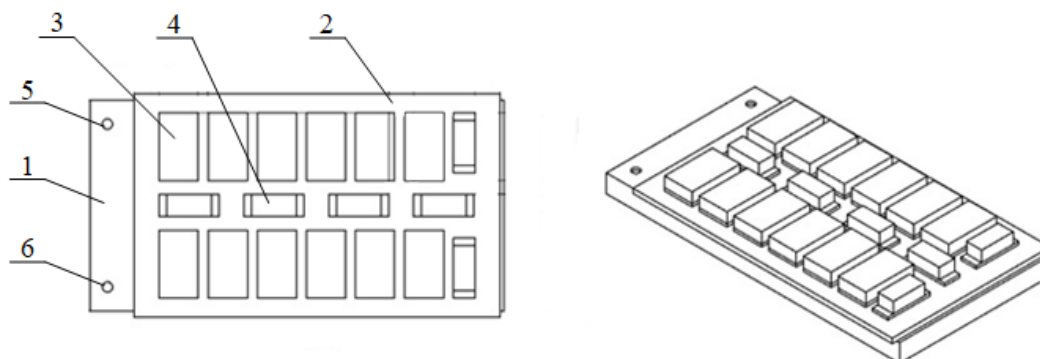


Рис. 1. Внешний вид плиты с модулями

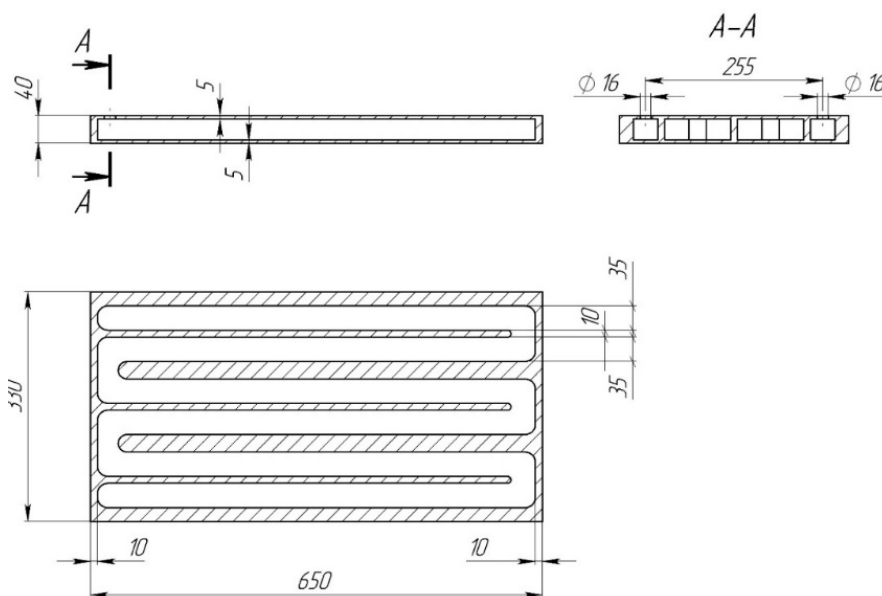
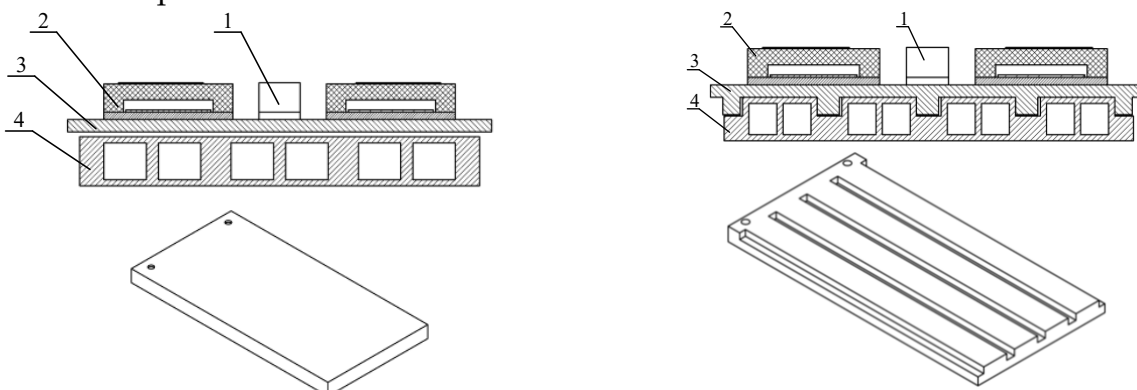
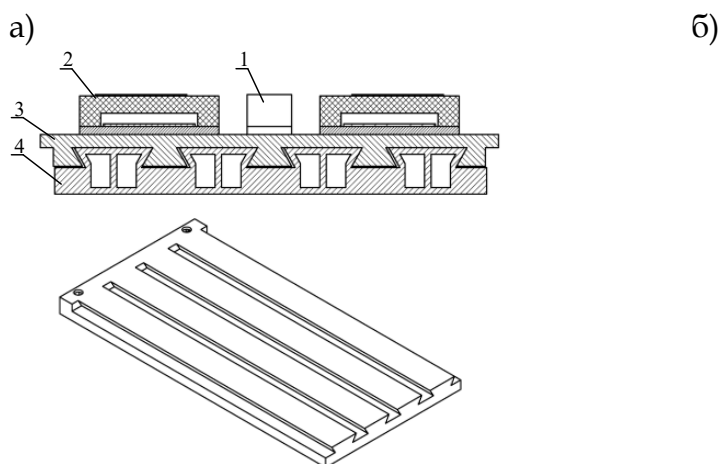


Рис. 2. Габаритные размеры охлаждающей плиты

Основной целью исследования был выбор вида конструктивного исполнения сопрягаемых поверхностей охлаждающей плиты и монтажной панели при таком типе соединения деталей этих поверхностей, который обеспечивает подвижность соединения. Рассматриваемые варианты конструкции сопряжения охладителя 4 с монтажной панелью 3, на которой закреплены полупроводниковые модули 2 и фиксирующие диоды 1, представлены на рис.3.





в)

Рис. 3. Виды конструктивного исполнения сопрягаемых поверхностей охлаждающей плиты и монтажной панели: а) плоское соединение; б) прямой паз; в) ласточкин хвост.

Как видно из рис.3, теплообмен будет осуществляться посредством поверхностей непосредственного контакта и зазоров, обусловленных подвижностью разъемного соединения. Реальные поверхности непосредственного контакта обладают шероховатостью, неровностями и волнистостью, что значительно снижает реальную площадь контакта поверхностей [12], увеличивая площадь поверхности, осуществляющей теплообмен конвективным способом (через зазоры), как показано в таблице 1.

Таблица 1. Характеристика величины площади контактного теплообмена для различных конструктивных исполнений плиты охлаждения

Вид конструктивного исполнения	Величина площади контактной теплопроводности, мм ²	Величина площади конвективной передачи тепла в воздушном зазоре, мм ²
Плоская плита (контакт без зазора, идеальный вариант)	189750	0
Плоская плита (контакт с зазором)	0	189750
Прямоугольный паз (контакт без зазора)	174800	71300
Ласточкин хвост	179780	121512

Величину допустимого зазора для подвижного разъемного соединения определяем по рекомендациям [13] как посадку низкой точности H11/d11. Данная посадка предназначена для подвижных соединений, не требующих точности перемещения, и для неподвижных грубоцентрированных соединений. В грубых квалитетах (11-й, 12-й) это предпочтительные посадки с минимальным гарантированным зазором, необходимым для компенсации отклонений расположения сопрягаемых поверхностей, защитных покрытий, наносимых на поверхности, или обеспечения подвижности соединений в условиях запыления и загрязнения и т. п. Для $20H11_0^{+130}$, $20d11_{-195}^{-65}$ значение максимального зазора составляет 0,325 мм.

Критерии подбора конструкционных материалов для изготовления плиты охлаждения (далее «плита») и монтажной панели (далее «панель») следующие:

- доступность материалов (распространённость);
- теплопроводность;
- коррозионная стойкость;
- электрохимическая совместимость разнородных металлов и сплавов;
- обрабатываемость (механическая обработка, свариваемость, пайка);
- плотность;
- стоимость.

Результат анализа материалов, рассматриваемых для конструктивного исполнения сопрягаемых поверхностей, представлен в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Сравнительная характеристика материалов, возможных к конструктивному применению в качестве охладителя и монтажной плиты.

Материал	Доступность	Теплопроводность	Коррозионная стойкость		Обрабатываемость	Плотность ρ , кг/м ³	Цена, руб./кг
		Справочный коэффициент λ , Вт/(м·К)	мм/год	Оценка			
Медь (М-1)	Доступно	387	0,005 ÷ 0,25	Высокая	Высокая	8940	1205
Латунь (Л-63)	Доступно	120	0,0025 ÷ 0,025	Низкая ÷ высокая	Высокая	8600	77
Алюминий (АМГ-3)	Доступно	110 - 120	-	Высокая	Высокая	2680	550
Сталь (Ст3)	Доступно	55	0,05 ÷ 0,2	Низкая ÷ средняя	Высокая	7800	5

Таблица 3. Электрохимическая совместимость материалов, возможных к конструктивному применению в качестве охладителя и монтажной плиты

Материал	Медь (М-1)	Латунь (Л-63)	Алюминий (АМГ-3)	Сталь (Ст45)
Медь (М-1)	С*	С*	Н*	Н*
Латунь (Л-63)	С*	С*	Н*	Н*
Алюминий (АМГ-3)	Н*	Н*	С*	А*
Сталь (Ст45)	Н*	Н*	А*	С*

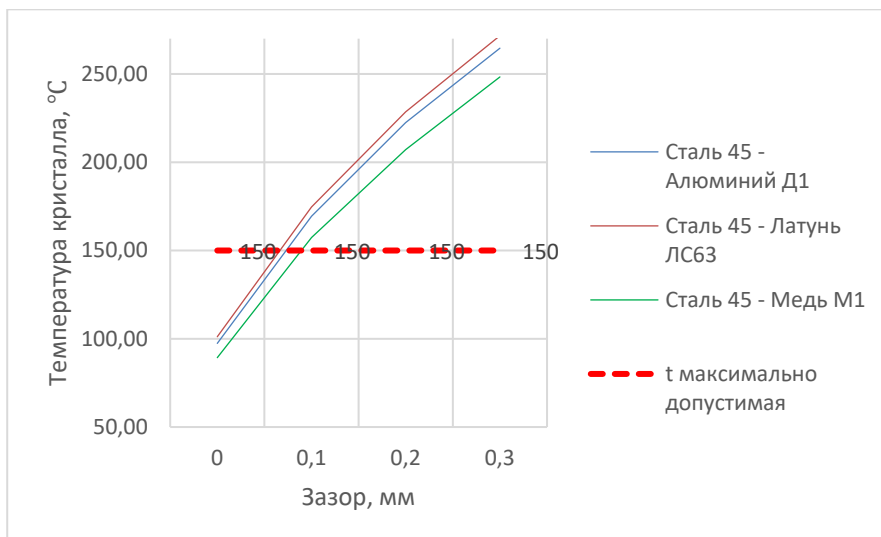
*С - сочетаются; Н - не сочетаются; А - ограниченно допустимы в атмосферных условиях

Главным критерием, при котором силовая схема будет работать корректно – это то, чтобы рабочая температура корпуса и изоляционных материалов не превышала $T_c = 125^\circ\text{C}$ при этом рабочая температура кристалла силового полупроводникового модуля должна соответствовать $T_{vj}(\text{op}) = -40\dots+150^\circ\text{C}$ [14 - 16].

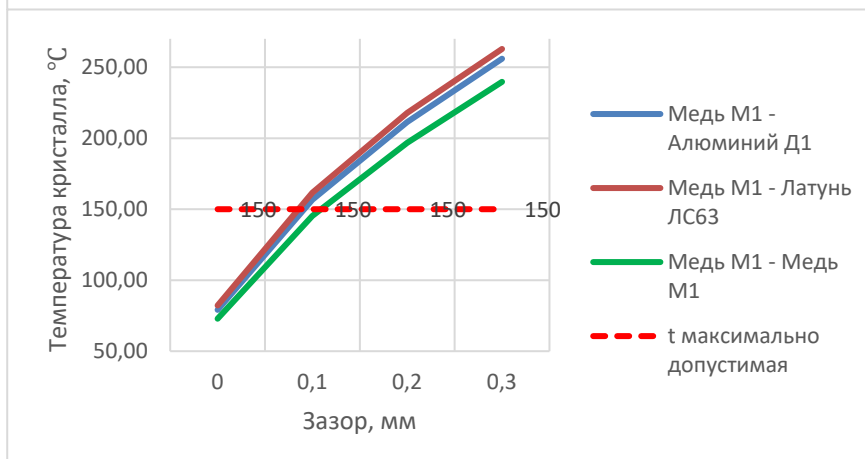
В результате теплового моделирования в программном пакете Flow Simulation различных принятых сочетаний материалов и конструктивных исполнений поверхностей теплообмена получен ряд зависимостей, указывающих на реализуемость каждого из рассматриваемых вариантов. В моделировании учитывалась как величина возможного зазора между сопрягаемыми поверхностями, так и качество поверхности контакта.

Зависимости температуры кристалла в зависимости от величины зазора и выбранного материала сопрягаемых поверхностей охладителя и плиты представлены на рис. 4.

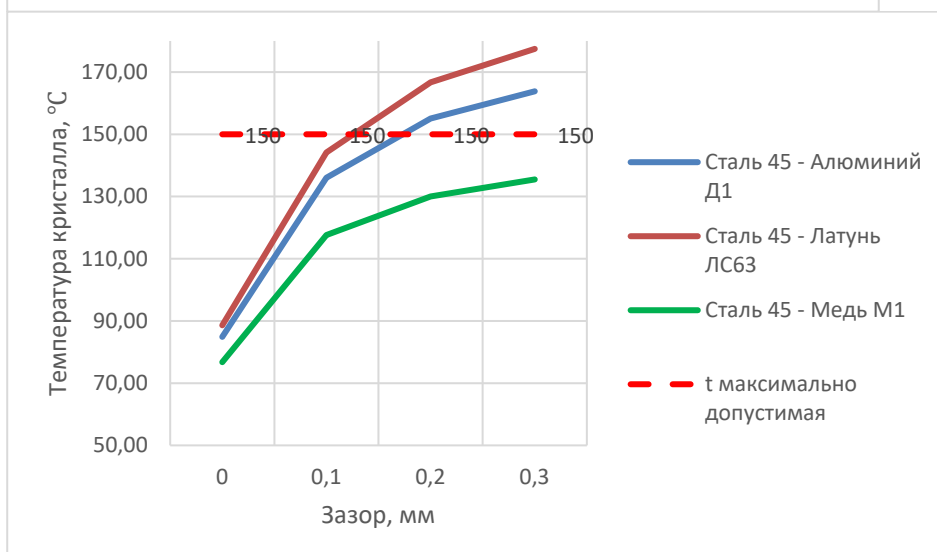
а)



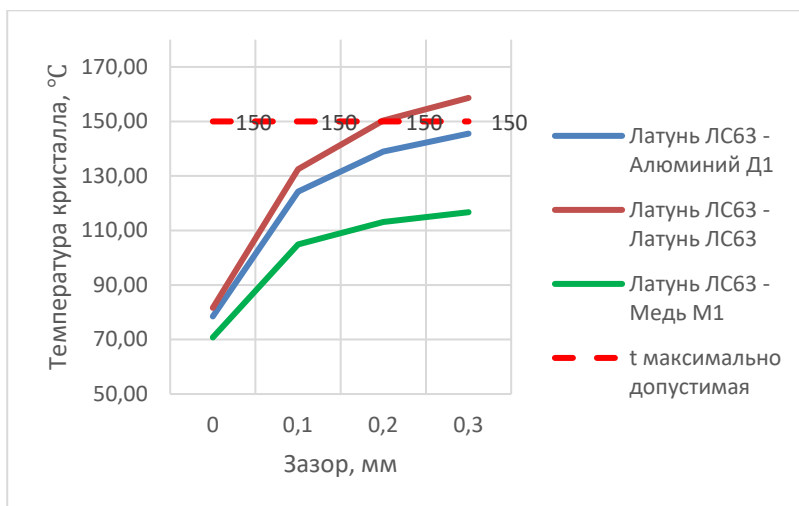
б)



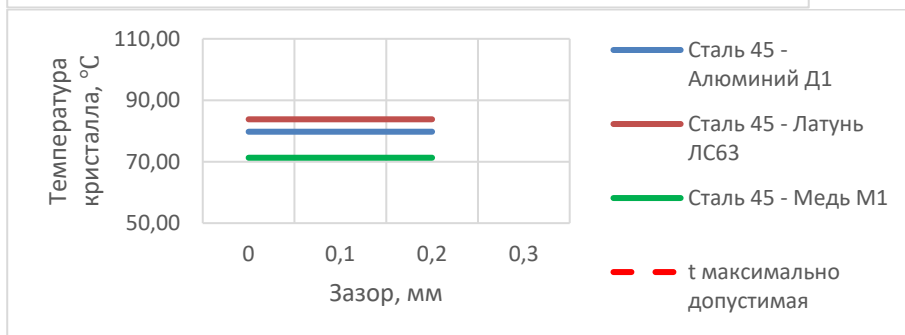
в)



г)



д)



е)

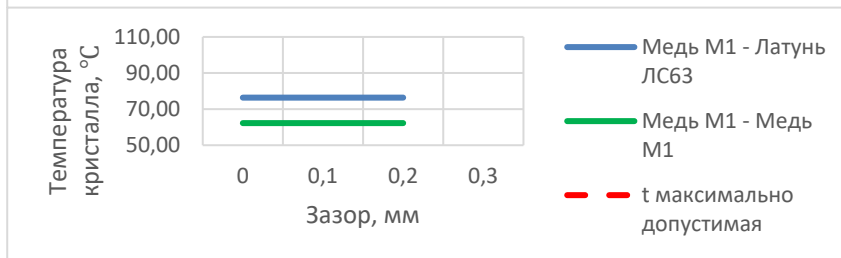


Рис. 4. Зависимости величины температуры кристалла силового полупроводникового модуля от величины зазора между сопрягаемыми поверхностями для различных сочетаний сопрягаемой поверхности применяемых материалов поверхностей: а) при плоской конструкции и стального охладителя; б) при плоской конструкции и медного охладителя; в) при конструкции прямого паза и стального охладителя; г) при конструкции прямого паза и медного охладителя; д) при конструкции ласточкин хвост и стального охладителя; е) при конструкции ласточкин хвост и медного охладителя.

Как видно из рис.4 большая площадь поверхности плоского соединения малоэффективна в сравнении с соединением ласточкин хвост, имеющего меньшую величину контактной площади, поскольку последнее конструктивное исполнение позволяет минимизировать величину зазоров соединения, обеспечивая более плотный контакт.

На рис.5 показано, что снижение температуры охлаждающей жидкости хоть и влияет на величину температуры кристалла охлаждаемого модуля, но совсем не является определяющим фактором при выборе конструктивного исполнения соединения охладитель – панель.

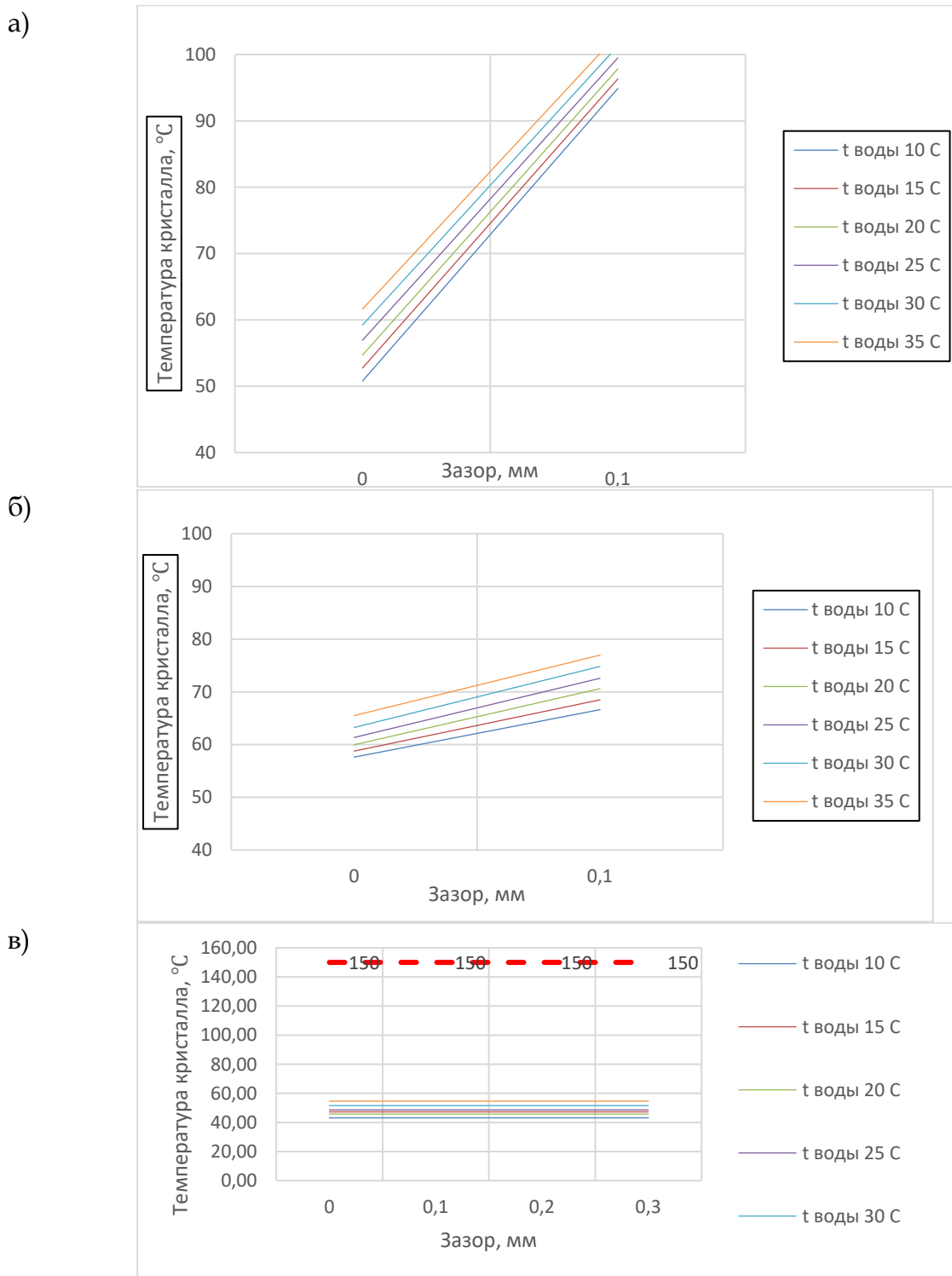


Рис. 5. Зависимости темпа роста величины температуры кристалла силового полупроводникового модуля от величины зазора между сопрягаемыми поверхностями для различной температуры охлаждающей жидкости: а) для плоской конструкции; б) для конструкции прямой паз; в) для конструкции ласточкин хвост.

Рис.6 показывает, что количество охлаждающей жидкости, проходящей через охладитель, значительно влияет на качество теплоотвода независимо от конструктивного исполнения сопрягаемых поверхностей.

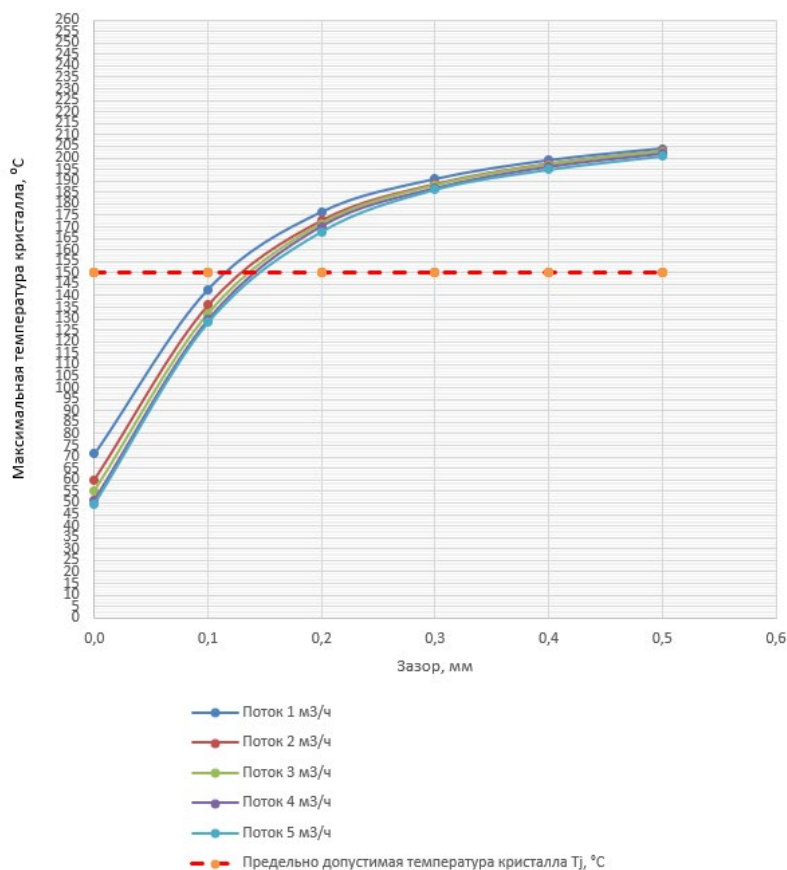
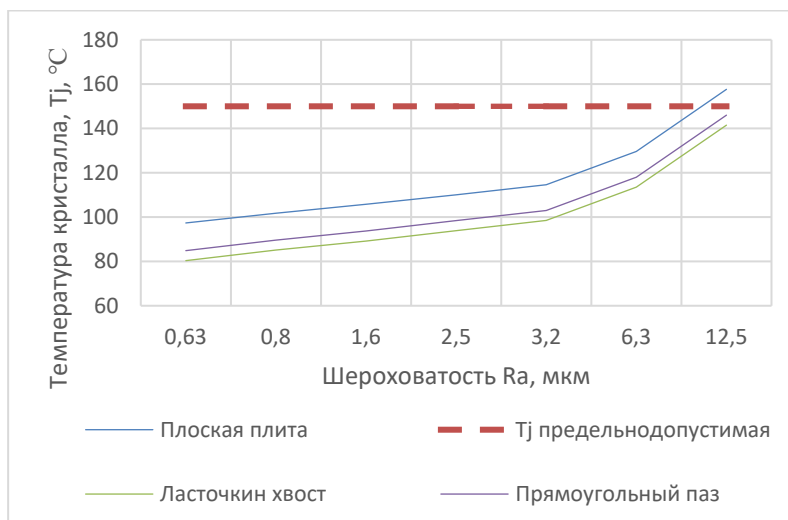


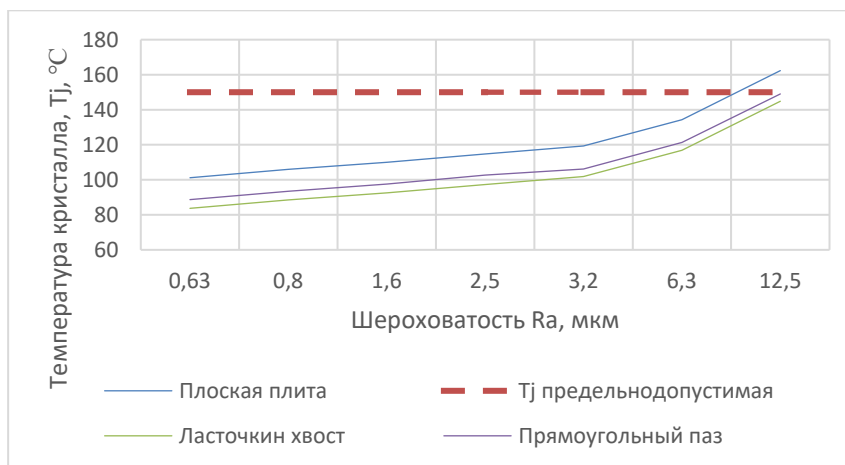
Рис. 6. Зависимость температуры кристалла полупроводникового модуля от зазора при разных значениях количества охлаждающей жидкости

Учет шероховатости и качества сопрягаемых поверхностей выполнялся по методике, изложенной в [17] согласно вычисленным значениям приведенного контактного теплового сопротивления [18, 19]. Результат анализа приведен на рис.7.

а)



б)



в)

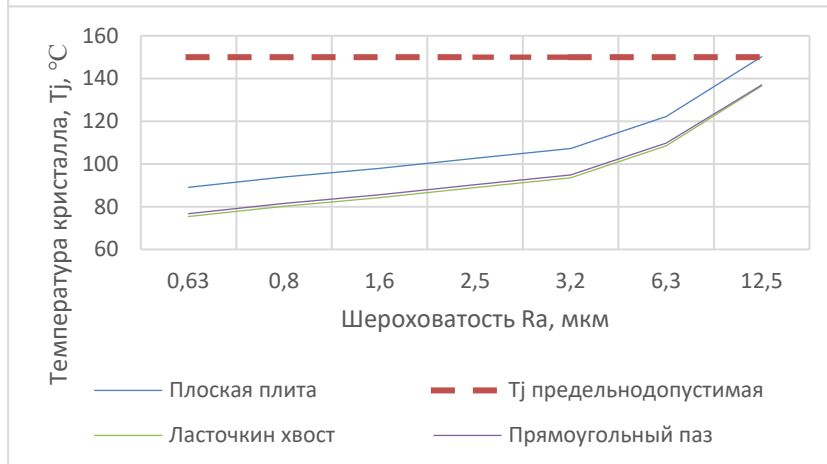


Рис. 7. Зависимость температуры кристалла полупроводникового модуля от величины шероховатости сопрягаемых поверхностей: а) для охладителя из стали 45 и монтажной плиты из алюминия Д1; б) для охладителя из стали 45 и монтажной плиты из латуни ЛС63; в) для охладителя из стали 45 и монтажной плиты из меди М1.

Данные рис.7 указывают, что использование разъёмного соединения для охлаждения силовой электроники возможно только с шероховатостью контактируемых поверхностей не грубее Ra 6,3 мкм.

Выводы

Таким образом, практически возможна конструктивная реализация подвижной выемной конструкции полупроводникового преобразовательного модуля очистного комбайна при выполнении ряда условий:

- конструктивное исполнение сопрягаемых поверхностей охладителя и монтажной панели – ласточкин хвост;
- шероховатость контактируемых поверхностей не грубее Ra 6,3 мкм;
- допустимая неплотность прилегания монтажной плиты к плоскости плиты охлаждения не более 0,1мм;
- температура охлаждающей жидкости на входе не более 30 °С;
- комбинация используемых материалов определяется количеством охлаждающей жидкости и ее температурой, рационально определять исходя из предпочтений конструктивного исполнения узлов электронного модуля.

Список литературы:

1. Косарев И.В., Андреев Г.В., Косарев А.В. Мельниченко А.А., Чайков Е.М., Мезников А.В. Очистные комбайны и системы их подачи // Уголь Украины. – 2013 - № 10. – С. 18-25.
2. Высокпроизводительный комбайн КДК500 с частотно-регулируемым приводом подачи / А.Н. Корольчук, И.В. Косарев, В.Л. Головин, В.С. Воскресенский // Уголь Украины. -2005. - №6. -С.71-73.
3. Горбатов П.А., Косарев В.В., Лысенко Н.М. Выемочные комбайны нового поколения как энергетические системы мехатронного класса – Донецк: Ноулидж, 2010.-с.173.
4. Биктиев Р., Немаев Д., Мускагиньев В., Кучумова М., Мещеряков В., Гришанин А. Высокоэффективные жидкостные охладители для изделий силовой электроники // Силовая электроника. 2019. №6.
5. Моделирование и оптимальное проектирование системы жидкостного охлаждения электронного модуля / Н. Э. Самойленко, Н. В. Ципина, Э. Э. Каграманов [и др.] // Радиотехника. – 2023. – Т. 87, № 8. – С. 105-109. – DOI 10.18127/j00338486-202308-17. – EDN DOPHIM.
6. Оптимизация конструкции системы охлаждения электронного модуля с помощью применения системы автоматизированного проектирования Solidworks / Н. Э. Самойленко, С. С. Потапов, И. В. Чепрасов, А. Ю. Барагузин // Sciences of Europe. – 2017. – № 16-1(16). – С. 93-101. – EDN ZHMTQP.
7. Савелов, П. И. Компьютерное моделирование теплообмена в электронной аппаратуре / П. И. Савелов, Ю. Е. Лившиц // Актуальные проблемы и пути развития энергетики, техники и технологий: Сборник трудов VI Международной научно-практической конференции, Балаково, 23 апреля 2020 года. Том 1. – Балаково: Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2020. – С. 233-237. – EDN LGUEBF.
8. IGBT модули IGBT M1AA-HB17SA-200N. Режим доступа:<https://proton-electrotex.com/IGBT-M1AA-HB17SA-200N>. – Загл. с экрана.
9. Тиристорные и диодные модули. Модуль диодный МД3-245-18-F. Режим доступа: <https://proton-electrotex.com/MD3-245-18-F>. – Загл. с экрана.
10. Железко Ю. С. Потери электроэнергии реактивная мощность качество электроэнергии / Ю. С. Железко // Руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – 70 с.
11. SolidWorks Flow simulation— программный комплекс САПР для вычислительной гидродинамики (CFD), встроенное в SOLIDWORKS 3D CAD и позволяющее моделировать потоки жидкости и газа для вычисления рабочих характеристик и возможностей изделия. [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-flow-simulation>
12. Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъёмных и неразъёмных соединений. М., "Энергия", 1971, 216 с.
13. Анурьев В.И., Справочник конструктора-машиностроителя Т1/ В.И. Анурьев. – М.: Машиностроение, 2006. – 920 с.

14. Thermal Analysis of Si-Igibt Based Power Electronic Modules in 50kw Traction Inverter Application / M. Shahjalal, T. Shams, S. B. Hossain [et al.] // Social Science Research Network. – 2022. – DOI 10.2139/ssrn.4091251. – EDN GIALXK.
15. Asadi, A. Effects of constructal theory on thermal management of a power electronic system / A. Asadi, F. Pourfattah // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10, No. 1. – P. 1-14. – DOI 10.1038/s41598-020-78566-x. – EDN KREQVU.
16. Kurhade, Anant & Darade, Milind & Siraskar, Gulab & Biradar, Ramdas & Mahajan, Rupesh & Kardile, Chaitrali & Waware, Shital & Yadav, Rahul. (2024). State-of-the-Art Cooling Solutions for Electronic Devices Operating in Harsh Conditions. Journal of Mines, Metals and Fuels. 843-861. 10.18311/jmmf/2024/45374.
17. Дьяченко А.И., Марейченко И.В., Поважнюк А.Н. Метод учета качества обработки контактирующих поверхностей в тепловых расчетах систем охлаждения электронных модулей горных машин // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах – 2024 №4.
18. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
19. Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъёмных и неразъёмных соединений. М., "Энергия", 1971, 216 с.

References:

1. Kosarev I.V., Andreev G.V., Kosarev A.V., Melnichenko A.A., Chaikov E.M., Meznikov A.V. Shearers and their feed systems // Coal of Ukraine. - 2013 - No. 10. - P. 18-25.
2. High-performance combine KDK500 with frequency-controlled feed drive / A.N. Korolchuk, I.V. Kosarev, V.L. Golovin, V.S. Voskresensky // Coal of Ukraine. - 2005. - No. 6. - P. 71-73.
3. Gorbатов P.A., Kosarev V.V., Lysenko N.M. New generation shearers as mechatronic class energy systems - Donetsk: Knowledge, 2010.-p. 173.
4. Biktiev R., Nemaev D., Muskatinyev V., Kuchumova M., Meshcheryakov V., Grishanin A. Highly efficient liquid coolers for power electronics products // Power Electronics. 2019. No. 6.
5. Modeling and optimal design of a liquid cooling system for an electronic module / N. E. Samoilenko, N. V. Tshipina, E. E. Kagramanov [et al.] // Radio Engineering. - 2023. - Vol. 87, No. 8. - P. 105-109. - DOI 10.18127/j00338486-202308-17. - EDN DOPHIM.
6. Optimization of the design of the cooling system of the electronic module using the Solidworks automated design system / N. E. Samoilenko, S. S. Potapov, I. V. Cheprasov, A. Yu. Baraguzin // Sciences of Europe. - 2017. - No. 16-1 (16). - P. 93-101. - EDN ZHMTQP.
7. Savelov, P. I. Computer modeling of heat transfer in electronic equipment / P. I. Savelov, Yu. E. Livshits // Actual problems and ways of development of energy, engineering and technology: Collection of works of the VI International scientific and practical conference, Balakovo, April 23, 2020. Volume 1. - Balakovo: National Research Nuclear University MEPhI, 2020. - P. 233-237. - EDN LGUEBF.
8. IGBT modules IGBT MIAA-HB17SA-200N. Access mode: <https://proton-electrotex.com/IGBT-MIAA-HB17SA-200N>. – Title from the screen.

9. Thyristor and diode modules. Diode module MD3-245-18-F. Access mode: <https://proton-electrotex.com/MD3-245-18-F>. – Title from the screen.
10. Zhelezko Yu. S. Electric power losses reactive power quality of electric power / Yu. S. Zhelezko // Guide for practical calculations. - M.: ENAS, 2009. - 70 p.
11. SolidWorks Flow simulation is a CAD software package for computational fluid dynamics (CFD), built into SOLIDWORKS 3D CAD and allowing you to simulate liquid and gas flows to calculate the operating characteristics and capabilities of a product. [Electronic resource] Access mode: <https://www.solidworks.com/ru/product/solidworks-flow-simulation>
12. Popov V. M. Heat transfer in the contact zone of detachable and permanent connections. M., "Energy", 1971, 216 p.
13. Anurev V. I., Handbook of the mechanical designer T1 / V. I. Anurev. - M.: Mechanical Engineering, 2006. - 920 p.
14. Thermal Analysis of Si-Igbt Based Power Electronic Modules in 50kw Traction Inverter Application / M. Shahjalal, T. Shams, S. B. Hossain [et al.] // Social Science Research Network. - 2022. - DOI 10.2139/ssrn.4091251. - EDN GIALXK.
15. Asadi, A. Effects of constructal theory on thermal management of a power electronic system / A. Asadi, F. Pourfattah // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10, No. 1. – P. 1-14. – DOI 10.1038/s41598-020-78566-x. – EDN KREQVU.
16. Kurhade, Anant & Darade, Milind & Siraskar, Gulab & Biradar, Ramdas & Mahajan, Rupesh & Kardile, Chaitrali & Waware, Shital & Yadav, Rahul. (2024). State-of-the-Art Cooling Solutions for Electronic Devices Operating in Harsh Conditions. Journal of Mines, Metals and Fuels. 843-861. 10.18311/jmmf/2024/45374.
17. Dyachenko A.I., Mareychenko I.V., Povazhnyuk A.N. Method of accounting for the quality of processing of contacting surfaces in thermal calculations of cooling systems of electronic modules of mining machines // Methods and means of creating safe and healthy working conditions in coal mines - 2024 No. 4.
18. Wong H. Basic formulas and data on heat transfer for engineers. - M.: Atomizdat, 1979. - 216 p.
19. Popov V.M. Heat transfer in the contact zone of detachable and non-detachable joints. M., "Energy", 1971, 216 p.