

УДК 622.7:621.56

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАНЦИИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Марейченко Иван Вячеславович,

Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования», директор

Электронная почта: niive@list.ru

Россия, г. Донецк

Поважнюк Андрей Николаевич,

Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования», заведующий отделом электропривода

Электронная почта: niive@list.ru

Россия, г. Донецк

Дьяченко Андрей Иванович,

Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования», младший научный сотрудник

Электронная почта: niive@list.ru

Россия, г. Донецк

Аннотация

В статье предложен и исследован способ повышения эффективности замкнутой системы жидкостного охлаждения мощных электроприводов горного оборудования, эксплуатируемых в горных выработках со сложными условиями проветривания. На основе САД модели, разработанной в пакете SolidWorks Flow Simulation, проведено тепловое исследование работы станции охлаждения для оценки эффективности использования предложенного способа. Результаты показали повышение эффективности отведения тепловых потерь оборудования до 25% и уменьшение зависимости теплоотводящих свойств системы охлаждения от температуры воздушной струи. Предложенное конструктивное решение реализовано в новой станции охлаждения «Аквамарин-1», разработанной ГБУ «НИИВЭ». Практическая значимость работы заключается в применении исследуемого конструкторского решения для систем охлаждения мощных взрывозащищённых электроприводов в условиях сложной горно-геологической обстановки.

Ключевые слова: жидкостное охлаждение, замкнутая система охлаждения, тепловые потери, горное оборудование, взрывозащищённое электрооборудование, пластинчатый теплообменник, тепловое моделирование.

INVESTIGATION OF A METHOD TO INCREASE THE EFFICIENCY OF AN EXPLOSION-PROOF EQUIPMENT COOLING STATION

Mareychenko Ivan Vyacheslavovich,

State budgetary institution scientific-research, project-designing and technological institute of explosion proof and mine electrical equipment, director

E-mail: niive@list.ru

Russia, Donetsk

Povazhnyuk Andrey Nikolaevich,

State budgetary institution scientific-research, project-designing and technological institute of explosion proof and mine electrical equipment, head of the electric drive department

E-mail: niive@list.ru

Russia, Donetsk

Dyachenko Andrey Ivanovich,

State budgetary institution scientific-research, project-designing and technological institute of explosion proof and mine electrical equipment, junior research assistant

Email: niive@list.ru

Russia, Donetsk

ABSTRACT

The article proposes and investigates a method for increasing the efficiency of a closed liquid cooling system for powerful electric drives of mining equipment operated in mining operations with difficult ventilation conditions. Based on the CAD model developed in the SolidWorks Flow Simulation package, a thermal study of the cooling station operation was conducted to evaluate the effectiveness of using the proposed method. The results showed an increase in the efficiency of heat loss removal of equipment by up to 25% and a decrease in the dependence of the heat dissipation properties of the cooling system on the temperature of the air stream. The proposed design solution is implemented in the new Aquamarine-1 cooling station developed by GBU NIIVE. The practical significance of the work lies in the application of the studied design solution for cooling systems of powerful explosion-proof electric drives in difficult mining and geological conditions.

Keywords: liquid cooling, closed cooling system, heat losses, mining equipment, explosion-proof electrical equipment, plate heat exchanger, thermal modeling.

Введение. Рост плотности коммутируемой мощности и энерговооруженности современного горного оборудования сопровождается значительным увеличением тепловых нагрузок на силовые модули преобразователей частоты и другие электронные компоненты. В условиях эксплуатации во взрывоопасных средах угольных шахт и рудников задача надежного отвода тепла становится критически важной для обеспечения безопасности, долговечности и стабильной работы электрооборудования. При этом тенденция к созданию компактных преобразовательных устройств выявила ограниченность традиционных систем воздушного охлаждения, которые способны эффективно отводить

тепло лишь до определённого уровня мощности [1]. Практический опыт эксплуатации показывает, что при мощностях свыше 100 кВт применение воздушных охладителей становится нецелесообразным, и требуется переход к жидкостным системам охлаждения [2].

При разработке комплектного устройства управления частотно-управляемого электропривода магистрального ленточного конвейера мощностью до 500 кВт была применена именно схема замкнутой системы жидкостного охлаждения для отвода тепловых потерь от силовых полупроводниковых устройств и аппаратов. Замкнутая система жидкостного охлаждения предусматривает, соответственно, необходимость использования насосного и охлаждающего оборудования, интегрированного в состав комплектного устройства управления или в виде отдельного изделия.

Для охлаждения мощных электроприводов рационально применять выносные станции охлаждения. Так в составе взрывозащищенного преобразователя частоты ПЧВ-К-250 нами была разработана и успешно применена станция охлаждения типа СОРЭ 4-20 (рисунок 1).



Рисунок 1 – Станция охлаждения СОРЭ 4-20

Практика эксплуатации показала, что для повышения эффективности такие станции необходимо размещать на свежей струе воздуха. Однако при этом возникает ряд проблем: значительное расстояние до объекта приводит к удлинению трубопроводов, что снижает качество циркуляции охлаждающей жидкости и усложняет размещение оборудования по геологическим характеристикам условий эксплуатации.

Рынок не насыщен предложениями компактных станций охлаждения для взрывозащищенного электрооборудования. Известна холодильная установка взрывобезопасная УХВ компании ООО «Электромашина» (рисунок 2), которая может применяться для охлаждения электрических и неэлектрических машин и механизмов, имеющих внутренний контур жидкостного охлаждения.

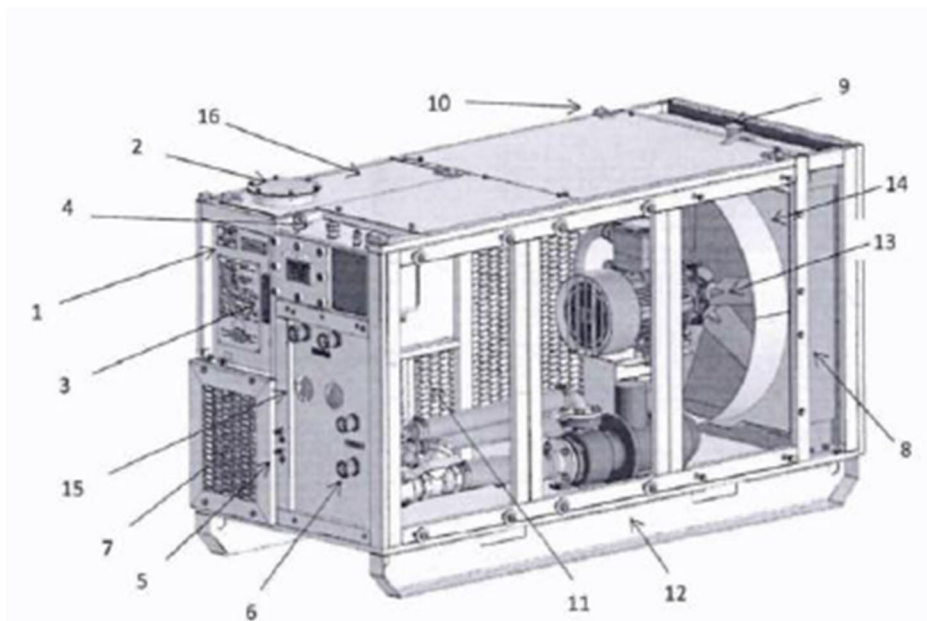


Рисунок 2 – Установка холодильная взрывобезопасная УХВ

Однако представленные конструкции обладают общим недостатком: эффективность охлаждения существенно зависит от температуры окружающего воздуха. В большинстве случаев это не критично, так как температура в выработках обычно ниже $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Но в условиях глубоких шахт, где скорость движения воздуха невелика, эффективность отвода тепла снижается, что требует вынесения станции на свежую струю.

Для условий текущего проекта решения, как применяемые нами ранее, так и предлагаемые на рынке не были удовлетворительны и достаточны для отвода тепловых потерь мощного взрывозащищенного преобразователя частоты, что потребовало разработки станции охлаждения учитывающей особенности эксплуатации в условиях ограниченного пространства и повышенной запыленности (рисунок 3).

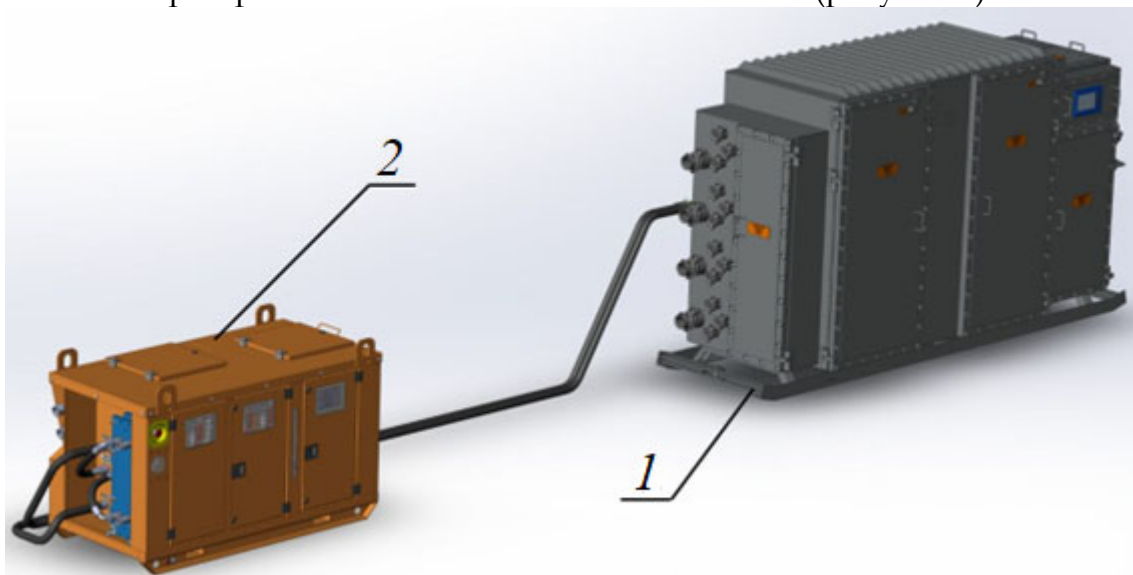


Рисунок 3 – Установки проектируемого мощного электропривода магистрального ленточного конвейера

В разработанной конструкции было предложено специфическое техническое решение, использующее особенности приводного механизма ленточного конвейера, которое оказалось достаточно удачным для повышения эффективности системы жидкостного охлаждения: дополнительный теплообменник типа «жидкость-жидкость».

Предпосылкой использования такого способа является использование технологических мер пылеподавления, применяемых в местах пересыпа приводной станции конвейера. Согласно требованиям безопасности шахт РФ, здесь используется мелкодисперсное орошение, создающее водяную завесу из противопожарно-оросительного трубопровода. Этот ресурс может быть задействован как теплоноситель внешнего контура теплообменника, что позволяет повысить эффективность отвода тепловых потерь и снизить зависимость системы от температуры окружающего воздуха.

Для оценки эффективности отвода тепловых потерь от силовых модулей преобразователя частоты была разработана САД-модель в пакете SolidWorks Flow Simulation, представленная на рисунках 4 и 5. Имитационная модель включает: теплоотводящие устройства охлаждения на которых расположены силовые модули (поз.1), теплообменник «жидкость-воздух» (поз.2) и вентилятор (поз.3) станции охлаждения, а также пластинчатый теплообменник «жидкость-жидкость» (поз.4), рассматриваемый в качестве дополнительной опции станции охлаждения. Все составные элементы соединены трубопроводами, формирующими замкнутый внутренний контур системы охлаждения.

Предварительный расчет тепловой нагрузки показал, что при мощности 500 кВт тепловые потери на силовых модулях составляют 22 кВт.

Для проверки эффективности системы были рассмотрены два основных сценария:

1. Базовый вариант (рисунок 4) – работа только с радиатором «жидкость-воздух» с принудительным обдувом.

– оценивается способность системы поддерживать допустимые температуры при номинальной тепловой нагрузке.

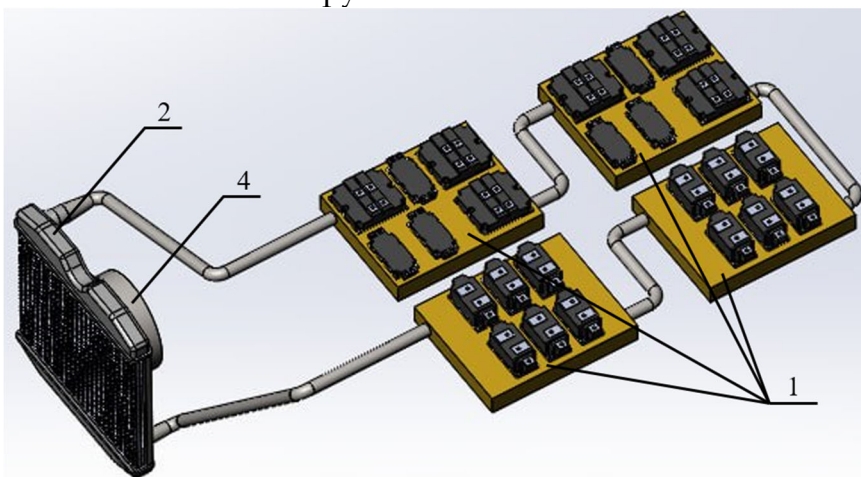


Рисунок 4 – САД-модель базовой системы охлаждения

2. Комбинированный вариант (рисунок 5) – последовательное подключение дополнительного пластинчатого теплообменника «жидкость-жидкость».

– внешний контур запитывается водой шахтного водопровода с температурой 25 - 27 °С.

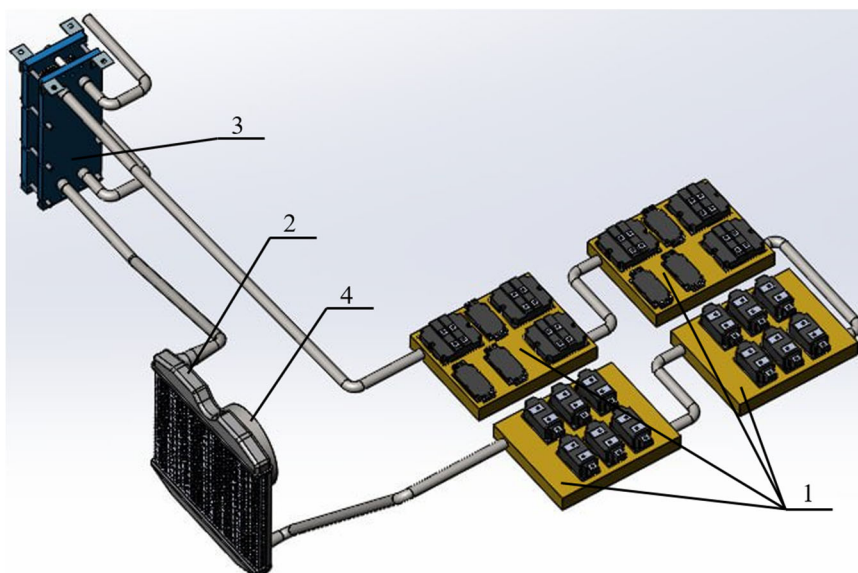


Рисунок 5 – CAD-модель комбинированной системы охлаждения

В результате исследования получены зависимости изменения температуры силовых модулей от изменения температуры окружающего воздуха в диапазоне от 25 до 40 °С (рисунок 6). Исследование проводилось при двух режимах охлаждения: в базовом и комбинированном варианте.

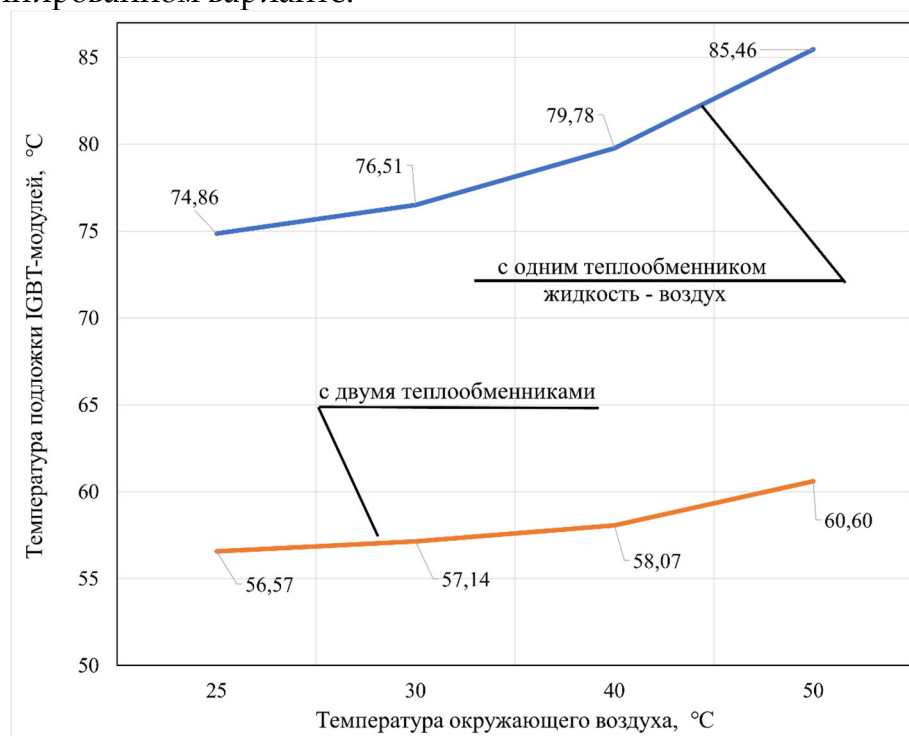


Рисунок 6 – Зависимость температуры IGBT-модулей от температуры окружающей среды при разных режимах охлаждения

В базовом варианте наблюдается линейный рост температуры модулей от 75 до 85 °С. В комбинированном варианте температура модулей возрастает менее интенсивно — от 56 до 61 °С, что свидетельствует о повышенной устойчивости системы к внешним тепловым воздействиям.

На рисунке 7 представлена диаграмма, демонстрирующая наглядную эффективность изменения температуры подложек силовых модулей при использовании двух вариантов охлаждения — базового и комбинированного — в зависимости от температуры окружающего воздуха.

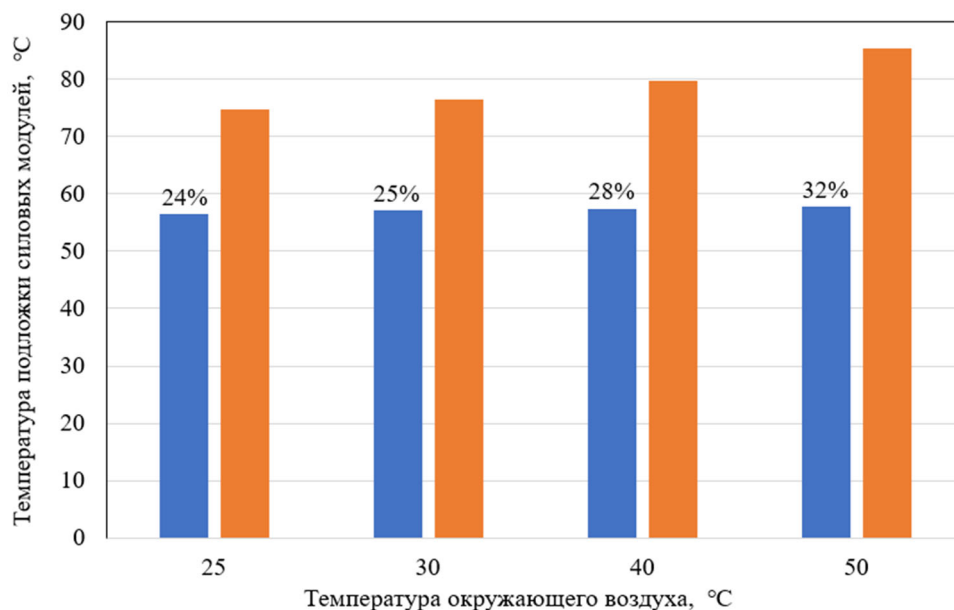


Рисунок 7 – Сравнение температуры подложки силовых модулей при базовом и комбинированном охлаждении

Каждой температуре соответствует пара столбцов:

- Оранжевые столбцы – температура подложки при базовом охлаждении.
- Синие столбцы – температура подложки при комбинированном охлаждении.

Исследование показало, что комбинированный вариант обеспечивает снижение температуры подложки силовых модулей в среднем на 25% по сравнению с базовым вариантом. При росте температуры окружающего воздуха эффективность комбинированного режима возрастает, что подтверждает его устойчивость и целесообразность применения в условиях повышенных тепловых нагрузок.

Предложенное конструкторское решение реализовано в новой разработанной станции охлаждения «Аквамарин-1» [4], представленной на рисунке 8. Использование данной станции способствует снижению эксплуатационных рисков и повышению надёжности работы систем охлаждения электрооборудования.



Рисунок 8 – Станция охлаждения рудничного оборудования «Аквамарин-1»

Полученное конструкторское решение может быть масштабировано для других типов оборудования, что расширяет возможности его применения в различных промышленных условиях.

Технические характеристики станции охлаждения рудничного оборудования «Аквамарин-1» приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные параметры станции охлаждения

Наименование показателя	Значение показателя
Номинальное напряжение, В	1140
Степень пылевлагозащиты, не менее	IP54
Исполнение для взрывозащищенного конструктивного исполнения	PB Ex [ib] I Mb
Исполнения для рудничного нормального исполнения	PN1
Объем, л	100
Габаритные размеры (ДхШхВ), мм не более	1600x770x950
Масса, кг не более	500
Мощность электродвигателя насоса, кВт, не более	1,5
Мощность электродвигателя вентилятора, кВт, не более	1,5
Расход охлаждающей жидкости, м ³ /ч	4
Давление жидкости в системе охлаждения, МПа	0,2
Интерфейс связи	цифровой RS485 Modbus RTU
Исполнение цепей управления для взрывозащищенного конструктивного исполнения	Искробезопасная цепь уровня ib
Климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69	У5

Вывод. Проведенное исследование модели замкнутой станции жидкостного охлаждения подтвердило эффективность применения конструктивного узла станции в составе замкнутой системы жидкостного охлаждения горного оборудования, эксплуатируемого в сложных условиях проветривания. Моделирование показало, что применение дополнительного жидкостного теплообменника позволило снизить температуру силовых модулей на 15 – 20 °С по сравнению с базовым вариантом, а также уменьшить чувствительность системы к росту температуры окружающей среды, что дает предпосылки расширения области применения мощных взрывозащищенных электроприводов.

Список литературы:

1. Немаев, Д. Прямое жидкостное охлаждение силовых модулей охлаждения улучшает эффективность теплоотвода / Д. Немаев, В. Мускатиныйев, Р. Биктиев // Силовая электроника. – 2021. – № 4(91). – С. 70-71. – EDN UPQSZS.
2. Биктиев Р., Немаев Д., Мускатиныйев В., Кучумова М., Мещеряков В., Гришанин А. Высокоэффективные жидкостные охладители для изделий силовой электроники // Силовая электроника. 2019. № 6.
3. Патент на полезную модель № 212055 U1 Российская Федерация, МПК F25B 1/00, G12B 15/02. Установка холодильная взрывобезопасная: № 2021136275: заявл. 09.12.2021: опубл. 05.07.2022 / А. М. Шевченко, А. А. Черняков, М. В. Дохненко; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Завод Электромашин". – EDN QLGCAL.
4. Компактная станция охлаждения электрического оборудования с возможностью выбора способа охлаждения, для работы в потенциально взрывоопасных средах /

И.В. Марейченко, А.Н. Поважнюк, А.И. Дьяченко // Материалы круглого стола «О путях и методах повышения производительности и эффективности использования оборудования в горной промышленности» 27 ноября 2025 г. – ГБУ «НИИВЭ». – С. 65-75.

References:

1. Nemaev, D. Direct liquid cooling of power cooling modules improves the efficiency of heat sink / D. Nemaev, V. Muscatinev, R. Biktiev // Power electronics. – 2021. – № 4(91). – Pp. 70-71. – EDN UPQSZS.
2. Biktiev R., Nemaev D., Muscatinev V., Kuchumova M., Meshcheryakov V., Grishanin A. High-performance liquid coolers for power electronics products. 2019. № 6.
3. Utility Model Patent No. 212055 U1 Russian Federation, IPC F25B 1/00, G12B 15/02. Explosion-proof refrigeration unit: No. 2021136275: application 09.12.2021: published 05.07.2022 / A.M. Shevchenko, A. A. Chernyakov, M. V. Dokhnenko; applicant Limited Liability Company "Plant Electromashina". – EDN QLGICAL.
4. Compact cooling station for electrical equipment with a choice of cooling method for operation in potentially explosive environments / I.V. Mareichenko, A.N. Povazhnyuk, A.I. Dyachenko // Materials of the round table "On ways and methods of increasing productivity and efficiency of equipment use in the mining industry" November 27, 2025 – GBU "NIIVE", pp. 65-75.