



<https://doi.org/10.15407/scin16.04.012>

А.Г. ДЕМІШЕВ

Донецький фізико-технічний інститут ім. О.О. Галкіна НАН України,
просп. Науки, 46, Київ, 03028, Україна,
+380 44 277 5115, afu@afu.kiev.ua

СИСТЕМА КРІОГЕННОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КРІОМАГНІТНОГО КОМПЛЕКСА КМК–1000 НА БАЗІ МІКРОКРІОГЕННИХ СИСТЕМ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛУ

Вступ. Розвиток галузі збагачувальних виробництв означив вимоги з розроблення суттєво нових технологій та обладнання, зокрема й методу магнітної сепарації.

Проблематика. Перевага кріомагнітних комплексів магнітної сепарації визначається ефективністю вирішення проблеми створення їхньої системи кріогенного забезпечення.

Мета. Розробка системи кріогенного забезпечення (СКЗ) кріомагнітного комплексу на базі мікрокріо-генних систем замкнутого циклу (МКС).

Матеріали й методи. Матеріалом роботи є конструкція СКЗ з вбудованою надпровідною магнітною системою (НМС) і двома МКС. Ефективність використання МКС визначається методом аналізу теплового балансу їхніх модулів.

Результати. Розроблено конструкцію СКЗ на базі безазотного кріостата з вбудованою НМС і двома МКС та рішення проблеми ефективного використання МКС методом аналізу теплового балансу їх модулів. Конструкція вузлів введення модулів МКС та горловини, а також ємності, опор і екранів одночасно є системою жорсткості та ефективного відводу теплоприпливів з них на відповідні ступені модулів МКС. Конструкція СКЗ забезпечує ефективність роботи в стаціонарному режимі з надмалим запасом зрідженого гелію по кільцевому процесу «рідина–газ–реконденсація», в якому газорідинна суміш гелію є ідеальним холодопровідом. Конструкція СКЗ забезпечує технологічність регламентних робіт, навіть зі зміною модулів горловини та і МКС, без розгерметизації кріостата.

Висновки. Рішення конструкторсько-технологічних та науково-технічних проблем створення СКЗ базується на патентах України № 103949 та № 88830. Обґрунтовано доцільність створення СКЗ комплексу на базі кріостата з вбудованою НМС і двома МКС, що працює в стаціонарному режимі з надмалим запасом зрідженого гелію.

Ключові слова: кріомагнітний комплекс, система кріогенного забезпечення кріомагнітного комплексу.

Цитування: Демішев А.Г. Система кріогенного забезпечення кріомагнітного комплексу КМК–1000 на базі мікрокріогенних систем замкнутого циклу. *Nauka innov.* 2020. Т. 16, № 4. С. 12–24. <https://doi.org/10.15407/scin16.04.012>

В Інтернет-просторі існує низка рекламних публікацій фірм щодо криомагнітних сепараторів, призначених для роботи у виробничих умовах збагачувальних виробництв з метою високоградієнтної магнітної сепарації слабкомагнітних руд, каолінів та інших корисних копалин та вугілля безпосередньо в умовах теплових електростанцій. Це розробки фірм *Carpko* (Бразилія) – криофільтр *HGMS* для збагачування каоліну, *Outokumpu 5T Cryofilter Models – Industrial 5T\360,500,1000*, *Outokumpu Technology Inc.* (Фінляндія), *Physical Separation Division 6100 Phillips Highway* (США), *Jacksonville, FL3221* (США) та цистерн і танкерів для перевезення зріджених газів. Одним з ключових питань, що визначають переваги створених комплексів, цікавих у сенсі пропонованої розробки, є надпровідна магнітна система, конструкція опор гелієвої ємності та екранів, а також конструкція введення модулів мікрокриогенних систем замкнутого циклу (МКС) та ефективного використання їхньої холодопродуктивності. Безумовно, що наведені науково-технічні та конструкторсько-технологічні проблеми фірмами успішно реалізовані, але детальні конструкторські рішення ніде не описані, оскільки є комерційною таємницею. Тож наводити посилання на рекламні публікації не має сенсу. Варто зазначити відносно новий напрямок створення систем криогенного забезпечення з МКС за технологією *Cryogen Free* (сухих, незріджених криоагентів, в яких криостат використовується вже як теплоізолюючий екран. Незважаючи на всі переваги такого рішення, створення системи криогенного забезпечення (СКЗ) складних великогабаритних багатотонажних криомагнітних комплексів (КМК) з їхнім використанням є складним процесом.

Перевага криомагнітних комплексів магнітної сепарації визначається ефективністю вирішення проблеми створення їхньої системи криогенного забезпечення. Комплекс КМК-1000 розташований поблизу котлоагрегату. Сепаратор пилувугільного палива з температурою близь-

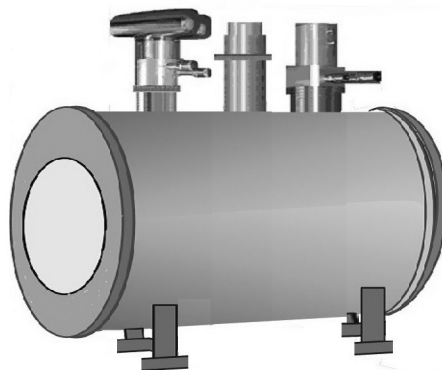


Рис. 1. Зовнішній вигляд криомагнітної частини комплексу

ко 100 °С розташовано безпосередньо всередині отвору криостата. Суттєву проблему становить запобігання взаємодії магнітного поля соленоїда з близько розташованими металевими конструкціями, а також захист обслуговуючого персоналу від шкідливого впливу розсіяного магнітного поля. Це суттєво відрізняє пропоновану розробку від всіх вище згаданих.

Метою роботи є розробка базової конструкції системи криогенного забезпечення на базі мікрокриогенних систем замкнутого циклу та створення дослідно-промислового зразка криомагнітного комплексу КМК з метою відпрацювання конструкції та регламенту роботи як для подальшого впровадження на інших теплоелектростанціях (ТЕС) для очищення пилувугільного палива, так і для промислових виробництв збагачування та очищення корисних копалин від шкідливих домішок методом високоградієнтної магнітної сепарації.

До складу криомагнітної частини комплексу КМК–1000 входить:

- ◆ система криогенного забезпечення на базі криостата та двох вбудованих МКС;
- ◆ надпровідна магнітна система (НМС).

Зовнішній вигляд криомагнітної частини комплексу наведено на рис. 1.

На основі конструкції СКЗ комплексу методом комплексного аналізу теплового балансу їхніх модулів з сумарним теплоприпливом на них було визначено ефективність холодо-

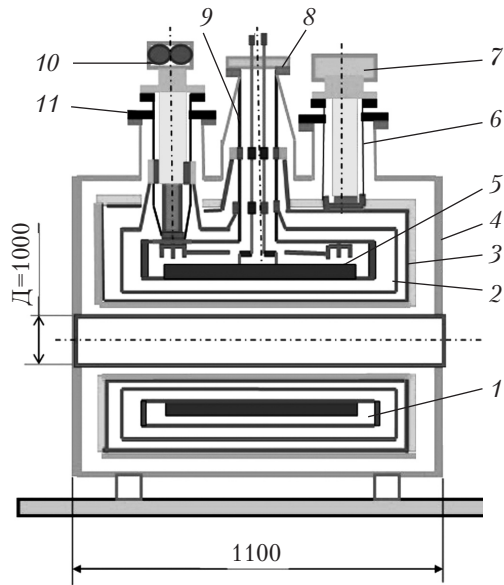


Рис. 2. Схема конструкції СКЗ комплексу КМК–1000: 1 – ємність гелієва; 2 – екран Е1; 3 – екран Е2; 4 – кожух зовнішній; 5 – соленоїд НМС; 6 – вузол вводу МКС AL200; 7 – МКС AL200; 8 – модуль вводу струмоводів і пристроїв індикації та захисту; 9 – горловина; 10 – МКС РТ415/РТ415-РМ; 11 – вузол введення модуля МКС РТ415/РТ415-РМ

продуктивності модулів МКС. Розробка СКЗ комплексу КМК–1000 базується на патентах України № 103949 і № 88830 [1, 2], роботі [3] та на розробці складової частини проекту Донецького інституту «Теплоелектропроект» з модернізації Придніпровської теплоелектростанції (ТЕС), виконаній відділом кріогенного приладобудування в Донецькому фізико-технічному інституті НАН України ім. О.О. Галкіна.

Схему конструкції СКЗ комплексу наведено на рис. 2.

Конструктивно до складу системи кріогенного забезпечення входить:

- ◆ гелієвий безазотний кріостат з системою екранів та опор, модулями введення МКС і модулем горловини з комплектом пристроїв безпеки та введенням систем управління й індикації про стан роботи СКЗ;
- ◆ дві вбудовані МКС фірми *Cryomech, INC* (РТ 415/РТ415-РМ – 40W@45К, 1.5 @ 4.2 К та AL 200-190W@80К) з автономно розташо-

ваними компресорами і системами їх живлення, діагностики й управління. Сумарне споживання електроенергії в мережі 60 Гц двома компресорами МКС та їхніми системами живлення, діагностики та управління становить біля 14 кВт. Збереження гелію в ємності визначається тільки щільністю введення елементів горловини. З практики експлуатації аналогічних установок відомо, що дозаправлення гелієм здійснюють раз на півроку або й раз на рік.

Соленоїд надпровідної магнітної системи вбудовано в гелієву ємність кріостата. Силкові струмовводи і вводи індикації про стан роботи НМС вбудовано в горловину кріостата. Пристрої безпеки НМС розташовано на горловині кріостата зовні.

Відповідальність та складність умов роботи комплексу поблизу котлоагрегата зумовили появу істотних особливостей та нетрадиційних рішень конструкторсько-технологічних та науково-технічних проблем при розробці СКЗ КМК. Насамперед слід зазначити проблеми та ризики при роботі СКЗ в умовах ТЕС та передбачити шляхи їх запобігання. З огляду на можливі наслідки аварії є безумовний сенс виконувати розробку, передбачаючи навіть неймовірний збіг всіх ризиків виникнення аварійної ситуації. Особливу проблему становлять накопичена енергія надпровідного соленоїда НМС та величезний об'єм зрідженого гелію в ємності кріостата. У разі аварійного переходу соленоїда або розгерметизації теплоізолюючої вакуумної порожнини кріостата спричиняється можливість миттєвого викиду значного об'єму газорідинної суміші гелію з непередбачуваними наслідками. То ж розмір та конструкція горловини кріостата, з розміщеними в ній вводами для живлення соленоїда та вводів індикації стану всіх систем, набуває суттєвого значення. Тому модуль горловини, розрахований на стрімке виведення накопиченої енергії НМС та викид газорідинної суміші гелію, розташовано окремо. З огляду на зазначене, слід розглянути важливі питан-

ня з надпровідним соленоїдом та запасом гелію в ємності, що необхідний для роботи системи в стаціонарному режимі.

Створення соленоїда з частково стабілізованого надпровідного кабелю потребує вирішення проблеми гарантованого виводу накопиченої енергії через незнімні струмовводи на розташовані зовні пристрої для її погашення. Тому важливо розглянути варіант соленоїда з повністю стабілізованого надпровідника. Цим знімається ризик миттєвого переходу соленоїда з надпровідного стану в нормальний, але це суттєво збільшує розміри соленоїда, та, як наслідок, всього кріостата СКЗ і комплексу КМК в цілому. До того ж це вирішує тільки проблему переходу соленоїда та не знімає проблему миттєвого викиду газорідинної суміші гелію у разі аварійної розгерметизації кріостата або і з будь-яких інших причин. То ж кінцевою та вирішальною проблемою є величезна кількість зрідженого гелію в ємності та можливий викид її в разі аварійної ситуації.

Кардинальне рішення цієї проблеми запропоновано у патенті України № 88830 на спосіб роботи кріосистеми згідно патенту «*Cryosystems GLR*» [2]. Визначальною ознакою запропонованого способу є можливість роботи СКЗ в стаціонарному режимі з надмалим запасом зрідженого гелію. Але, в наслідок великої тепломісткості ємності з вбудованою НМС в ній та теплоприпливу до ємності, накопичення запасу гелію, необхідного для забезпечення процесу живлення соленоїда й переведення його в стаціонарний режим та ще й залишку навіть для надмалого запасу зрідженням газоподібного гелію, що подається ззовні, буде майже нереальним завданням. Тому процес виведення СКЗ у стаціонарний режим реальніше здійснити у два етапи. Перший етап — це заохолодження системи та накопичення необхідного запасу гелію в ємності при роботі обох МКС; здійснюється заливанням гелію з транспортної судини Дьюара. Етап завершується заживленням соленоїда та виведенням його у стаціонарний режим з надпровідним

ключом. Другий етап — перехід СКЗ у стаціонарний режим роботи за способом «рідина—газ—реконденсація». Такий процес забезпечує безперервне функціонування як замкнений фізичний процес, що не потребує ніяких зовнішніх дій. Запас гелію в ємності визначають експериментально, за умови достатності для функціонування процесу. Слід зазначити те, що нижня частина соленоїда в ємності знаходиться у зрідженому гелії, а реконденсатор з розвинутою поверхнею розташовано у верхній частині мідної ємності, безпосередньо по контуру ємності й соленоїда.

Природна вентиляція в ємності встановлюється за рахунок того, що пари гелію піднімаються вгору до реконденсатора, а краплі конденсату з нього падають вниз на соленоїд. Принциповим є те, що, над дзеркалом зрідженого гелію, газорідинна суміш гелію у замкнутому процесі рідина—газ—реконденсація є постійним ідеальним холодопроводом на реконденсатор від всіх елементів ємності та НМС, незалежно від їхньої складності та розташування. Дотримання всіх умов виключає градієнт температури в ємності, а, відповідно, і перегрів соленоїда НМС та перехід його в нормальний стан. В результаті наведеного рішення створення СКЗ комплексу на основі запропонованого способу роботи кріосистеми «рідина—газ—реконденсація» у стаціонарному режимі є цілком прийнятним.

Соленоїд виконано з частково (близько 30 %) стабілізованого надпровідного кабелю, оснащеного системою виведення та погашення накопиченої енергії зовні. Внутрішній діаметр такого соленоїда становить 1200 мм, зовнішній — 1300 мм, довжина 700 мм. Робочий струм соленоїда 350 А, що майже вдвічі менше критичного. Відповідно, зовнішній діаметр ємності становить 1400 мм, довжина — 800 мм. В результаті визначено габаритні розміри кріостата СКЗ: зовнішній діаметр — 1550 мм, довжина — 110 мм. Соленоїд в горизонтальній циліндричній ємності розміщено зі зміщенням від центру вниз на 40 мм. Відповідно змі-

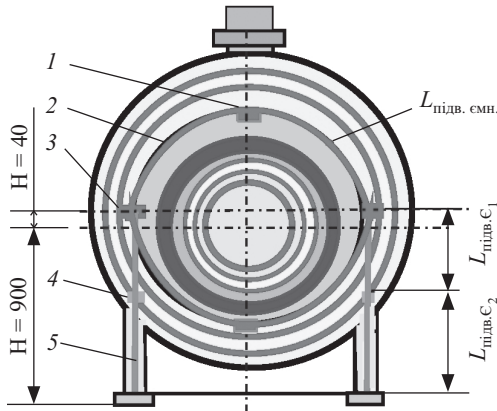


Рис. 3. Схема конструкції опор: 1 – вузол опори гелієвої ємності; 2 – рама опори гелієвої ємності; 3 – вузол опори гелієвої ємності і екрану E1; 4 – вузол опори екрану E2; 5 – рама опорна

щено й всі елементи отворів екранів та зовнішнього кожуху з фланцями.

Схему конструкції опор наведено на рис. 3.

Основою несівної конструкції є опорна рама. Торці циліндричної мідної гелієвої ємності виконано у вигляді несівних мідних фланців, підвішених (зверху та знизу) двома вузлами 1 до кільцевих рам 2 з квадратної труби. В свою чергу, рами 2 встановлено на опору двома вузлами 3. Аналогічно й торці мідних екранів E1 і E2 виконано у вигляді несучих мідних фланців. Екран E1 встановлено на раму опори в тому ж вузлі 3, а екран E2 – на раму опори вузла 4. Таким чином, мідні екрани, скріплені торцевими несучими мідними фланцями, встановленими на рами опор, виконують дві істотні функції – вони є елементами опор, що забезпечують стійкість бічних опорних рам, а також одночасно ефективним тепловідводом з вузлів опори їх на відповідні ступені модулів МКС на всіх трьох температурних рівнях.

Схематично конструкцію вузла введення модуля МКС РТ415/РТ415-РМ проілюстровано на рис. 4.

МКС, відповідно до довжини його ступеней і передбачуваної установки магнітного екрану захисту, піднято над кожухом кріостата. Перша ступень модуля, через холодозімник 7,

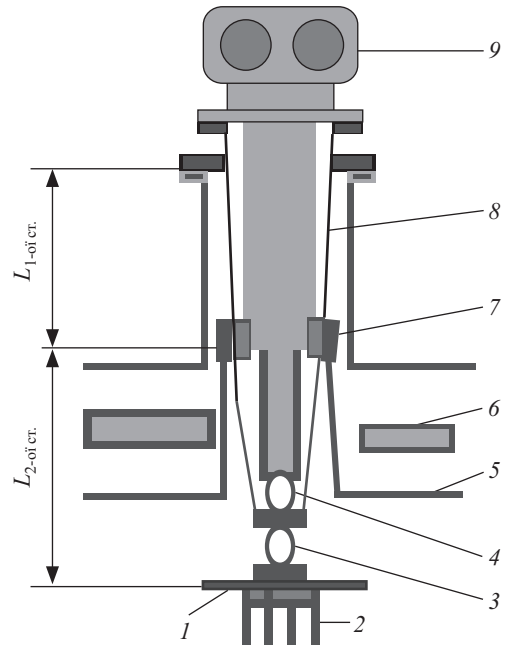


Рис. 4. Схема конструкції вузла введення модуля МКС РТ415/РТ415-РМ: 1 – ємність гелієва; 2 – холодозімник-реконденсатор Хемк; 3 – хладопровід вузла введення модуля МКС; 4 – хладопровід модуля МКС; 5 – екран E1; 6 – екран E2; 7 – холодозімник екрану Хе1; 8 – кожух вузла введення модуля МКС; 9 – модуль МКС РТ415/РТ415-РМ

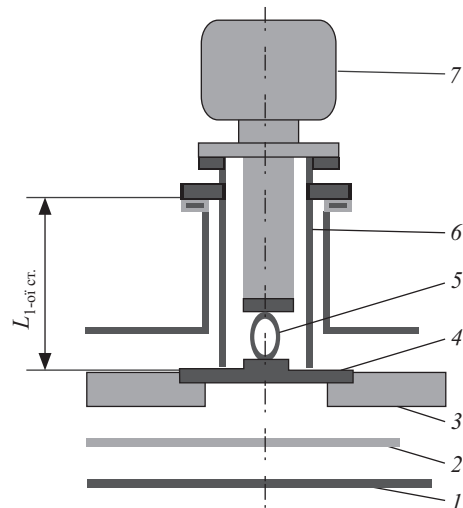


Рис. 5. Схема вузла вводу модуля МКС AL-200: 1 – ємність гелієва; 2 – екран E1; 3 – екран E2; 4 – холодозімник ХЕ2 екрану E2; 5 – хладопровід гнучкий; 6 – кожух вузла введення модуля МКС AL-200; 7 – модуль МКС AL-200

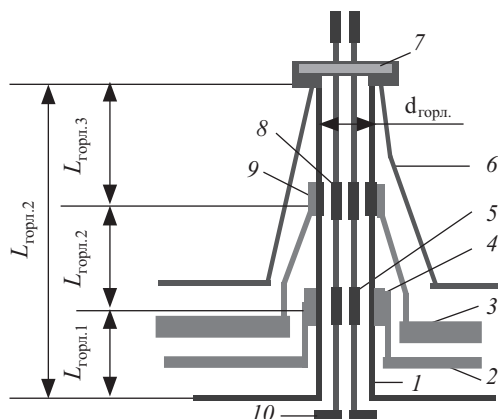


Рис. 6. Схема конструкції горловини: 1 – горловина гелієвої ємності; 2 – екран E1; 3 – екран E2; 4 – холодозімник X1горл.; 5 – холодозімник Xструм.1; 6 – кожух; 7 – модуль введення струмовводів і пристроїв індикації та захиту; 8 – холодозімник Xструм.2; 9 – холодозімник X2горл.; 10 – вузол з'єднання струмовводів

зв'язана з екраном E1 5. Торець модуля другої ступені з'єднано з дном його кожуха введення роз'єднувальним гнучким холодопроводом 4. У свою чергу, торець дна кожуха введення з'єднаний роз'єднувальним холодопроводом 3 з реконденсатором 2. Реконденсатор розташований безпосередньо над соленоїдом у верхній частині гелієвої мідної ємності 1 по всій її довжині.

Схему конструкції вузла введення модуля МКС AL-200 зображено на рис. 5.

Патрубок кожуха 6 введення МКС, відповідно з довжиною його модуля і можливою установкою магнітного екрана захисту, піднято над кожухом криостата. Модуль з'єднано з дном кожуха введення роз'єднувальним холодопроводом 5. У свою чергу, дно кожуха введення з'єднано з екраном E2 3 гнучким холодозімником 4.

В конструкції (рис. 6) горловину 1 зі знімним модулем із струмовводами та вузлами з'єднання з екранами умовно розділено на три частини. Перша – нижня частина горловини, безпосередньо приєднана до гелієвої ємності. То ж теплоприплив до неї є складовою частиною навантаження на другу ступінь МКС РТ415/РТ415-РМ. Друга, середня частина, зав-

дяки теплозімникам 4 та 5, через екран E1 2, заохолоджується тепловідводом на першу ступінь МКС РТ415/РТ415-РМ. Третя, верхня частина горловини, завдяки теплозімникам 8 та 9, через екран E2 поз. 3, заохолоджується тепловідводом на МКС AL-200. Тепловідвод безпосередньо зі стінки горловини здійснюється теплозімниками 4 та 9. Тепловідвід з внутрішніх конструкцій на стінку горловини здійснюється теплозімниками 5 та 8.

РОЗРАХУНКОВИЙ АНАЛІЗ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ СКЗ

Аналіз теплового балансу виконують розрахунковим методом за умови забезпечення компенсації сумарних теплоприпливів з елементів конструкцій СКЗ холодопродуктивністю модулів МКС на трьох відповідних температурних рівнях.

Розрахунки здійснюються за наведеними вище схемам конструкцій на основі методики, запропонованої в роботі [3]. Аналітичні дослідження теплового балансу виконують комплексно, з урахуванням теплоприпливів за словими струмовводами та вводами індикації про стан роботи НМС і СКЗ, що вбудовані в горловину криостата СКЗ.

Відповідно до зазначеного проведено:

- ◆ аналіз теплового балансу на температурному рівні 4.2 К другої ступені МКС РТ415/РТ415-РМ з припустимим сумарним теплоприпливом до гелієвої ємності у розмірі 1,35 Вт, прийнятого з урахуванням десятивідсоткового запасу;
- ◆ аналіз теплового балансу у розмірі 40 Вт на температурному рівні 45 К першої ступені МКС РТ415/РТ415-РМ з сумарним теплоприпливом на нього;
- ◆ аналіз теплового балансу на температурному рівні 80К МКС AL200 з припустимим сумарним теплоприпливом до нього у розмірі 180 Вт, прийнятого з урахуванням десятивідсоткового запасу.

Нижче наведено результати розрахунків теплового балансу СКЗ.

Тут і далі в розрахунках прийнято:

$T_{\text{емн.}} = 4,2 \text{ К}; T_{\text{Е1}} = 45 \text{ К}; T_{\text{Е2}} = 80 \text{ К}; T_{\text{кож.}} = 300 \text{ К};$
 $F_{\text{емн.}} = 7,3 \text{ м}^2; F_{\text{Е1}} = 8,95 \text{ м}^2; F_{\text{Е2}} = 9,8 \text{ м}^2; F_{\text{кож.}} =$
 $= 11,0 \text{ м}^2; \epsilon$ — постійна Стефана-Больцмана $=$
 $= 5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт/К}^4 \times \text{М}^2; \xi$ — ступінь чорноти.
 Для ємності та екранів, покритих шаром плівки ПЕТФ-ДА $\xi = 0,05; \xi_{\text{привед.}}$ — приведена ступінь чорноти поверхонь у теплообміні випромінюванням.

$$\xi_{\text{привед.}} = 1 / \{ 1 / \xi_2 + F_2 / F_1 (1 / \xi_{\text{Е1}} + 1) \} \quad (1)$$

$\lambda_{\text{середн.}}$ — середня величина теплопровідності в розрахунковому інтервалі температур — $\text{Вт/М} \times \text{К};$

Середні значення фізичних характеристик матеріалів в розрахункових інтервалах температур, прийняті в розрахунках, наведено в таблицях 1, 2 та 3.

Середні значення величин фізичних параметрів міді, сталі та гелію розраховано на під-

Таблиця 1. Середні значення фізичних характеристик сталі аустенітної 12Х18Н10Т

Розрахунковий інтервал температур T, К	Середня теплопровідність, λ , Вт/м К	Розрахунковий інтервал температур T, К	Середня теплопровідність, λ , Вт/м К
45–4,2	3,22	300–45	10,5
80–45	7,0	300–80	11,65

Таблиця 2. Середні значення фізичних характеристик міді М1

Розрахунковий інтервал температур T, К	Середня теплопровідність, λ , Вт/м К	Розрахунковий інтервал температур T, К	Середня теплопровідність, λ , Вт/м К
45–4,2	1260	300–45	485
80–45	825	300–80	475

Таблиця 3. Середні значення фізичних характеристик гелію газоподібного

Розрахунковий інтервал температур T, К	Середня теплопровідність, λ , Вт/м К	Розрахунковий інтервал температур T, К	Середня теплопровідність, λ , Вт/м К
45–4,2	28,825	300–45	101,65
80–45	56,075	300–80	110,12

ставі стандартних довідкових даних, наведених у регламентуючому документі «Перечень таблиц стандартних справочних даних (СТД и СД), действующих на 1 января 2008 г. в государствах — участниках Соглашения в области совместной разработки и использования данных о физических константах и свойствах веществ и материалов» [4].

Варто зауважити, що фізичні характеристики матеріалів, використаних при створенні реальної конструкції, можуть значно відрізнятися від наведених у таблицях. З іншого боку, розрахунки за наведеними середніми значеннями коректніше розглядати як близькі до реальності, проте все ж таки орієнтовні.

АНАЛІЗ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ НА ПЕРШОМУ ТЕМПЕРАТУРНОМУ РІВНІ 4.2К ДРУГОЇ СТУПЕНІ МКС РТ415/РТ415-РМ

Аналіз теплового балансу здійснюють за припустимим сумарним теплоприпливом до гелієвої ємності, прийнятого для розрахунку у розмірі 1,35 Вт, що компенсується з допомогою реконденсатора, вбудованого безпосередньо в гелієву ємність та захолюваного другою ступінню МКС.

Сумарний теплоприплив до гелієвої ємності визначається як:

$$Q_{\text{сум.емн.}} = Q_{\text{випр.Е1-емн}} + Q_{\text{опор.емн.}} + Q_{\text{кож.мод.2ступ.-емн.}} + Q_{\text{сум.горл.1}} \leq 1,35 \text{ Вт.} \quad (2)$$

Тут $Q_{\text{сум.емн.}}$ — сумарний теплоприплив до гелієвої ємності; $Q_{\text{випр.Е1-емн.}}$ — теплоприплив випромінюванням з екрану Е1 2 (рис. 2) на зовнішню поверхню гелієвої ємності; $Q_{\text{опор.емн.}}$ — теплоприплив теплопровідністю за опорами ємності 3 (рис. 3); $Q_{\text{кож.мод.2ступ.-емн.}}$ — теплоприплив до гелієвої ємності по кожуху введення другої ступені МКС РТ415/РТ415 — РМ (рис. 4); $Q_{\text{сум.горл.1}}$ — сумарний теплоприплив по нижній частині горловини (рис. 5).

Відповідно:

$$Q_{\text{випр.Е1-емн.}} = \epsilon \times \xi_{\text{привед.емн.}} \times F_{\text{емн.}} \times [T_{\text{Е1}}^4 - T_{\text{емн.}}^4] \text{ Вт.} \quad (3)$$

Відповідно до рівняння (1) $\varepsilon_{\text{привед.емн.}} = 0,025$.
Розрахунком за рівнянням (3) $Q_{\text{випр.Е1-емн}} = 0,042$ Вт.

$Q_{\text{опор.емн.}}$ розраховується відповідно до схеми конструкції, наведеної на рис. 2 і 3.

Опори ємності виконані у вигляді кільцевих рам 2 з квадратної труби зі сталі 12Х18Н10Т, закріплених у вузлах 3. Площа перерізу $S_{\text{опор.емн.}} = 0,00025$ м². Довжина сектора підвіски (всього 8 секторів) кільцевої рами $L_{\text{опор.емн.}} = 1,0$ м.

$$Q_{\text{опор.емн.}} = 8 \times \{\lambda_{\text{опор.емн.}} \times S_{\text{опор.емн.}} \times [T_{\text{мод.1}} - T_{\text{емн.}}]\} / L_{\text{опор.емн.}} \quad (4)$$

Сумарний теплоприплив з восьми секторів опор $Q_{\text{опор.емн.}}$ становить 0,26 Вт.

Теплоприплив $Q_{\text{мод.2-ої ступ.-емн.}}$ розраховується рівнянням:

$$Q_{\text{кож.мод.2ступ.-емн.}} = \lambda_{\text{Е1-емн.}} \times S_{\text{кож.мод.2-емн.}} \times [T_2 - T_{\text{емн.}}] / L_{\text{кож.мод.2-емн.}} \quad (5)$$

де $L_{\text{кож.мод.2}} = 0,25$ м, $S_{\text{кож.мод.2ступ.-емн.}} = 0,00026$ м²/труба $\varnothing 0,14$ м, $\delta = 0,0006$ м.

Згідно з розрахунком за наведеним рівнянням $Q_{\text{кож.мод.2-ої ступ.-емн.}} = 0,14$ Вт.

Розрахунок теплоприпливу в нижній частині горловини $Q_{\text{сум.горл.1}}$ виконують згідно зі схемою конструкції горловини, наведеної на рис. 6.

З урахуванням результатів попередніх розрахунків та умови $Q_{\text{сум.емн.}} \leq 1,35$ Вт, припустимий теплоприплив $Q_{\text{сум.горл.1}}$ має бути $\leq 0,9$ Вт.

Теплоприплив по горловині $Q_{\text{сум.горл.1}}$ визначається як:

$$Q_{\text{сум.горл.1}} = Q_{\text{ст.горл.1}} + Q_{\text{газ.горл.1}} + Q_{\text{сум.струм.1}} \quad (6)$$

де $Q_{\text{ст.горл.1}}$ – теплоприплив теплопровідністю по стінці горловини; $Q_{\text{газ.горл.1}}$ – теплоприплив теплопровідністю по стоячому стовпа газу в горловині; $Q_{\text{сум.струм.1}}$ – сумарний теплоприплив по струмовводам.

$$Q_{\text{ст.горл.1}} = \{\lambda_{\text{ст.горл.1}} \times S_{\text{ст.горл.1}} \times [T_{\text{2-ої ступ.}} - T_{\text{емн.}}]\} / L_{\text{горл.1}} \quad (7)$$

Для розрахунку прийнято: діаметр горловини – 0,06 м, товщина стінки – 0,001 м, $S_{\text{ст.горл.}} =$

$= 0,0002$ м², $L_{\text{горл.1}} = 0,25$ м; матеріал – сталь 08Х18Н10Т.

Відповідно $Q_{\text{ст.горл.1}} = 0,10$ Вт.

РОЗРАХУНОК ТЕПЛОПРИПЛИВУ ТЕПЛОПРОВІДНІСТЮ ПО НЕРУХОМОМУ СТОВПУ ГАЗУ В ГОРЛОВИНІ

$$Q_{\text{газ.горл.1}} = \{\lambda_{\text{газу}} \times S_{\text{газ.горл.1}} \times [T_{\text{Е1}} - T_{\text{емн.}}]\} / L_{\text{горл.1}} \quad (8)$$

$S_{\text{газ.горл.1}}$ – площа перерізу газу в горловині $= 0,002$ м²; $L_{\text{горл.1}} = 0,25$ м.

Відповідно $Q_{\text{газ.горл.1}} = 0,01$ Вт.

РОЗРАХУНОК ПРИПУСТИМИХ ПАРАМЕТРІВ СТРУМОВВОДІВ

З урахуванням вищенаведених результатів розрахунків припустима величина сумарного теплоприпливу по струмовводам в стаціонарному режимі, при нульовому струмі на них становить $Q_{\text{сум.струм.1}} \leq 0,79$ Вт.

Відповідно

$$Q_{\text{сум.струм.1}} = Q_{\text{сум.індик.струм.1}} + Q_{\text{сум.сил.струм.1}} \leq 0,79 \text{ Вт.} \quad (9)$$

Теплоприплив за індикаторними вводами $Q_{\text{сум.струм.індик.1}}$ визначається як:

$$Q_{\text{сум.індик.струм.1}} = \{\lambda_{\text{індик.1}} \times S_{\text{сум.індик.струм.1}} \times [T_{\text{Е1}} - T_{\text{емн.}}]\} / L_{\text{інд.струм.1}} \quad (10)$$

де $S_{\text{сум.індик.струм.1}}$ – площа перерізу 1×10^{-6} м²; $L_{\text{інд.струм.1}}$ – довжина вводів в скручуванні $= 0,4$ м; відповідно $Q_{\text{сум.індик.струм.1}} = 0,13$ Вт.

РОЗРАХУНОК ПРИПУСТИМИХ ПАРАМЕТРІВ СИЛОВИХ СТРУМОВВОДІВ В СТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМІ

В стаціонарному режимі $Q_{\text{сум.сил.струм.1}}$ у стоячому стовпі газу, при нульовому струмі, незнімні струмовводи розраховуються як пасивний теплопровід.

З урахуванням результатів попередніх розрахунків припустимий переріз силових струмовводів розраховується з умови $Q_{\text{сум.сил.струм.1}} \leq 0,66$ Вт.

$$Q_{\text{сум.сил.струм.1}} = \{\lambda_{\text{струм.1}} \times S_{\text{сум.сил.струм.1}} \times [T_{\text{Е1}} - T_{\text{емн.}}]\} / L_{\text{сил.струм.1}} \leq 0,66 \text{ Вт,} \quad (11)$$

де $L_{\text{сил.струм.1}}$ – розрахункова довжина силових струмовводів в скручуванні = 0,4 м.

Відповідно сумарний переріз двох силових струмовводів $S_{\text{сум.сил.струм.1}} \leq 5,1 \times 10^{-6} \text{ м}^2$.

АНАЛІЗ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ НА ТЕМПЕРАТУРНОМУ РІВНІ 45К ПЕРШОЇ СТУПЕНІ МКС РТ415/РТ415-RM

Аналіз виконують за припустимим сумарним теплоприпливом $Q_{\text{сум.мод.1}}$ на першу ступень МКС, який компенсується її холодопродуктивністю 40 Вт:

Сумарне теплове навантаження $Q_{\text{сум.мод.1}}$ визначається як:

$$Q_{\text{сум.мод.1}} = Q_{\text{опор.Е1}} + Q_{\text{кож.мод.1-Е1}} + Q_{\text{випр.Е2-Е1}} - Q_{\text{випр.Е1-емн.}} + Q_{\text{сум.горл.2}} \leq 40 \text{ Вт}, \quad (12)$$

де $Q_{\text{сум.мод.1}}$ – сумарний теплоприплив на першу ступінь МКС; $Q_{\text{опор.Е1}}$ – теплоприплив з опор екрану Е1 2 (рис. 3); $Q_{\text{кож.мод.1-Е1}}$ – теплоприплив по верхній частині кожуха введення 8 (рис. 4) модуля першого ступеня МКС; $Q_{\text{випр.Е2-Е1}}$ – теплоприплив випромінюванням з екрану Е2 3 на екран Е1 2 (рис. 2); $Q_{\text{випр.Е1-емн.}} =$ у папередньому розділі розрахунку визначена = 0,042 Вт; $Q_{\text{сум.горл.2}}$ – теплоприплив з середньої частини горловини з струмовводами з теплознімника 4 (рис. 6).

Розрахунок теплоприпливу $Q_{\text{опор.Е1}}$, згідно з схемою конструкції, наведеної на рис. 3 і 4.

$$Q_{\text{опор.Е1}} = \{\lambda_{\text{опор.Е1}} \times S_{\text{сум.опор.Е1}} \times [T_{\text{Е2}} - T_{\text{Е1}}]\} / L_{\text{опор.Е1}}, \quad (13)$$

де $S_{\text{сум.опор.Е1}} = 0,0015 \text{ м}^2$, $L_{\text{опор.Е1}} = 0,4 \text{ м}$.

Згідно розрахунку $Q_{\text{опор.Е1}} = 0,9 \text{ Вт}$.

Розрахунок теплоприпливу $Q_{\text{кож.мод.1-Е1}}$ до екрану Е1 по кожуху введення першої ступені МКС РТ415/РТ415-RM, згідно зі схемою конструкції, наведеної на рис. 4.

$$Q_{\text{кож.мод.1-Е1}} = \{\lambda_{\text{кож.мод.1-Е1}} \times S_{\text{кож.мод.1-Е1}} \times [T_{\text{кож.}} - T_{\text{Е1}}]\} / L_{\text{кож.мод.1-Е1}}, \quad (14)$$

де $L_{\text{кож.мод.1-Е1}} = 0,2 \text{ м}$, $S_{\text{кож.мод.1-Е1}} = 0,00035 \text{ м}^2$ (труба $\varnothing 140 \text{ мм}$, $\delta = 0,8 \text{ мм}$, сталь 12Х18Н10Т).

Згідно з розрахунком $Q_{\text{кож.мод.1-Е1}} = 4,7 \text{ Вт}$.

Теплоприплив випромінюванням $Q_{\text{випр.Е2-Е1}}$ з екрану Е2 на Е1 визначається як:

$$Q_{\text{випр.Е2-Е1}} = \epsilon \times \xi_{\text{привед.Е1}} \times F_{\text{Е1}} \times [T_{\text{Е2}} - T_{\text{Е1}}], \text{ Вт.} \quad (15)$$

Згідно з розрахунком за наведеним вище рівнянням (1) $\xi_{\text{привед.Е1}} = 0,025$. Відповідно $Q_{\text{випр.Е2-Е1}} = 0,57 \text{ Вт}$.

З урахуванням результатів розрахунку складових теплового балансу і умови $Q_{\text{сум.мод.1}} \leq 40 \text{ Вт}$ припустима величина $Q_{\text{сум.горл.2}} \leq 33,8 \text{ Вт}$.

Сумарна величина теплоприпливу в середній частині горловини визначається як:

$$Q_{\text{сум.горл.2}} = Q_{\text{ст.горл.2}} + Q_{\text{газ.горл.2}} + Q_{\text{сум.струм.2}} \leq 33,8 \text{ Вт}, \quad (16)$$

де $Q_{\text{ст.горл.2}}$ – теплоприплив теплопровідністю по стінці горловини; $Q_{\text{газ.горл.2}}$ – теплоприплив теплопровідністю по нерухомому стовпу газу в горловині; $Q_{\text{сум.струм.2}}$ – сумарний теплоприплив по струмовводам.

Величина теплоприпливу стінкою горловини $Q_{\text{ст.горл.2}}$ визначається як:

$$Q_{\text{ст.горл.2}} = \{\lambda_{\text{ст.горл.2}} \times S_{\text{ст.горл.2}} \times [T_{\text{Е2}} - T_{\text{Е1}}]\} / L_{\text{горл.2}}, \quad (17)$$

де $L_{\text{горл.2}}$ – довжина стінки горловини, 0,2 м; $S_{\text{ст.горл.2}}$ – площа перерізу стінки горловини, 0,0002 м². Відповідно $Q_{\text{ст.горл.2}} = 0,23 \text{ Вт}$.

Теплоприплив за газом в горловині $Q_{\text{газ.горл.2}}$ визначається як:

$$Q_{\text{газ.горл.2}} = \{\lambda_{\text{газ.горл.2}} \times S_{\text{горл.2}} \times [T_{\text{Е2}} - T_{\text{Е1}}]\} / L_{\text{горл.2}}, \quad (18)$$

де $S_{\text{горл.2}}$ – площа перерізу газу в горловині, 0,002 м². Відповідно $Q_{\text{газ.горл.2}} = 0,019 \text{ Вт}$. У підсумку $Q_{\text{сум.струм.2}}$ повинно бути $\leq 33,5 \text{ Вт}$.

Розрахунок припустимих параметрів струмовводів на середній частині горловини:

$$Q_{\text{сум.струм.2}} = Q_{\text{сум.індик.струм.2}} + Q_{\text{сум.сил.струм.2}} \leq 33,5 \text{ Вт}; \quad (19)$$

$$Q_{\text{сум.індик.струм.2}} = \{\lambda_{\text{індик.2}} \times S_{\text{сум.індик.струм.2}} \times [T_{\text{Е2}} - T_{\text{Е1}}]\} / L_{\text{індик.струм.2}}, \quad (20)$$

де $S_{\text{сум.індик.струм.2}}$ – площа перерізу індикаторних ввідів = $1 \times 10^{-6} \text{ м}^2$, $L_{\text{індик.струм.2}}$ – довжина в скручуванні = 0,4 м. Відповідно $Q_{\text{сум.індик.струм.2}} = 0,1 \text{ Вт}$.

Розрахунок перерізу $S_{\text{сум.сил.струм.2}}$ силових струмоводів виконують з урахуванням результатів попередніх розрахунків – припустимий переріз силових струмоводів розраховується з умови $Q_{\text{сум.сил.струм.2}} \leq 33,4$ Вт.

$$Q_{\text{сум.сил.струм.2}} = \{\lambda_{\text{сил.струм.2}} \times S_{\text{сум.сил.струм.2}} \times [T_{\text{E2}} - T_{\text{E1}}]\} / L_{\text{сил.струм.2}} \leq 33,4 \text{ Вт}, \quad (21)$$

де $L_{\text{сил.струм.2}}$ – розрахункова довжина в скручуванні, 0,4 м.

Згідно результатів розрахунку $S_{\text{сум.сил.струм.2}} \leq 4,76 \times 10^{-4} \text{ м}^2$.

АНАЛІЗ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСУ НА ТРЕТЬОМУ ТЕМПЕРАТУРНОМУ РІВНІ 80 МКС AL200

Аналіз теплового балансу на температурному рівні 80К, відповідно до схеми введення модуля МКС AL200 (рис. 5), виконують за прийнятого для розрахунків припустимого сумарного теплоприпливу $Q_{\text{сум.3}} \leq 180$ W, що визначається як:

$$Q_{\text{сум.3}} = Q_{\text{кож.мод.-E2}} + Q_{\text{опор.E2}} + Q_{\text{випр.кож.-E2}} - Q_{\text{випр.E2-E1}} + Q_{\text{сум.горл.3}} \leq 180 \text{ Вт}, \quad (22)$$

де $Q_{\text{кож.мод.-E2}}$ – теплоприплив на екран E2 по кожуху 6 рис. 5 введення модуля МКС; $Q_{\text{опор.E2}}$ – теплоприплив з опор екрану E2 3 (рис. 3); $Q_{\text{випр.кож.-E2}}$ – теплоприплив випромінюванням з кожуха на екран E2 3 (рис. 2); $Q_{\text{випр.E2-E1}}$, – стікання тепла випромінюванням з екрану E2 на екран E1. Розрахунком аналізу на температурному рівні 45 К вже визначена величина $Q_{\text{випр.E2-E1}} = 0,57$ Вт; $Q_{\text{сум.горл.3}}$ – теплоприплив до екрану E2 з теплознімача 9 (рис. 6) з верхньої частини горловини з струмововодами.

Розрахунок теплоприпливу $Q_{\text{кож.мод.-E2}}$ проводиться за рівнянням:

$$Q_{\text{кож.мод.-E2}} = \{\lambda_{\text{кож.-E2}} \times S_{\text{кож.мод.-E2}} \times [T_{\text{кож.}} - T_{\text{E2}}]\} / L_{\text{кож.мод.-E2}}, \quad (23)$$

де $L_{\text{кож.мод.-E1}} = 0,35$ м, $S_{\text{кож.мод.-E2}} = 0,00022 \text{ м}^2$ (труба діаметром 90 мм, товщина 0,8 мм).

Розрахунком за наведеним рівнянням $Q_{\text{кож.мод.-E2}} = 1,61$ Вт.

Розрахунок теплоприпливу за опорами $Q_{\text{сум.опор.E2}}$ проводиться за рівнянням:

$$Q_{\text{сум.опор.E2}} = \{\lambda_{\text{опор.E2}} \times S_{\text{сум.опор.E2}} \times [T_{\text{кож.}} - T_{\text{E2}}]\} / L_{\text{опор.E2}}, \quad (24)$$

де $\lambda_{\text{опор.E2}} = 11,65 \text{ Вт/М} \times \text{К}$; $S_{\text{сум.опор.E2}} = 0,002 \text{ м}^2$, $L_{\text{опор.E2}} = 0,5$ м.

Розрахунком відповідно отримаємо $Q_{\text{опор.E2}} = 10,25$ Вт.

Розрахунок теплоприпливу випромінюванням з кожуха на екран E2

$\xi_{\text{кож.}}$ – для кожуха із сталі 12X18H10T прийнято 0,06, ξ_{E2} – для екрану, захищеного шаром суперізоляції, дорівнює 0,05.

Розрахунком $\xi_{\text{привед.E2}} = 1 / \{1/\xi_{\text{E2}} + F_{\text{E2}}/F_{\text{кож.}} (1/\xi_{\text{кож.}} + 1)\}$ отримуємо значення 0,026.

Теплоприплив випромінюванням з кожуха на екран E2 визначиться як:

$$Q_{\text{випр.кож.-E2}} = 6 \times \xi_{\text{привед.E2}} \times F_{\text{E2}} \times [T_{\text{4кож.}} - T_{\text{4E2}}]. \quad (25)$$

Відповідно $Q_{\text{випр.кож.-E2}} = 145$ Вт.

З урахуванням результатів попередніх розрахунків, теплоприплив до екрану E2 з верхньої частини горловини $Q_{\text{сум.горл.3}}$ повинен бути $\leq 23,0$ Вт.

АНАЛІЗ СУМАРНОГО ТЕПЛОПРИТОКУ ПО ВЕРХНЬОЇ ЧАСТИНІ ГОРЛОВИНИ $Q_{\text{сум.горл.3}}$

Аналіз здійснюють відповідно до схеми конструкції, наведеної на рис. 6.

Згідно з попереднім аналізом теплового балансу МКС AL 200 припустима величина $Q_{\text{сум.горл.3}}$ повинна бути $\leq 23,0$ Вт. Отже,

$$Q_{\text{сум.горл.3}} = Q_{\text{ст.горл.3}} + Q_{\text{газ.горл.3}} + Q_{\text{сум.струм.3}} \leq 23,0 \text{ Вт}, \quad (26)$$

де $Q_{\text{ст.горл.3}}$ – теплоприплив теплопровідністю по стінці горловини; $Q_{\text{газ.горл.3}}$ – теплоприплив теплопровідністю по стоячому стовпу газу в горловині; $Q_{\text{сум.струм.3}}$ – сумарний теплоприплив за струмововодами.

Теплоприплив теплопровідністю по стінці горловини $Q_{\text{ст.горл.3}}$ визначається як:

$$Q_{ст.горл.3} = \{\lambda_{ст.горл.3} \times S_{ст.горл.3} \times [T_{кож.} - T_{E2}]\} / L_{горл.3} \quad (27)$$

$L_{горл.3}$ – розрахункова довжина стінки горловини, 0,2 м; $S_{ст.горл.3}$ – площа перерізу стінки горловини, 0,0002 м². Відповідно $Q_{ст.горл.3} = 2,44$ Вт.

Теплоприплив теплопровідності по газу в горловині $Q_{газ.горл.3}$ визначається як

$$Q_{газ.горл.3} = \{\lambda_{газ.3} \times S_{газ.горл.3} \times [T_{кож.} - T_{E2}]\} / L_{горл.3} \quad (28)$$

де $S_{газ.горл.3}$ – площа перерізу газу в горловині, 0,002 м²; $L_{горл.3}$ – довжина теплопровідного стовпа газу, 0,2 м. Відповідно $Q_{газ.горл.3} = 0,24$ Вт.

Розрахунок припустимих параметрів струмоводів на верхній частині горловини виконують з урахуванням результатів попередніх розрахунків $Q_{сум.струм.3} \leq 20,3$ Вт.

Відповідно

$$Q_{сум.струм.3} = Q_{сум.індик.струм.3} + Q_{сум.сил.струм.3} \leq 20,3 \text{ Вт}, \quad (29)$$

де $Q_{сум.індик.струм.3}$ – сумарний теплоприплив по індикаторним струмоводам; $Q_{сум.сил.струм.3}$ – сумарний теплоприплив за двома силовими струмоводами.

Теплоприплив $Q_{сум.індик.струм.3}$ визначається як

$$Q_{сум.індик.струм.3} = \{\lambda_{індик.3} \times S_{сум.індик.} \times [T_{кож.} - T_{E2}]\} / L_{індик.3} \quad (30)$$

де $S_{сум.індик.струм.3}$ – площа перерізу вводитів, 1×10^{-6} м²; $L_{індик.3}$ – розрахункова довжина в скручуванні, 0,4 м. Відповідно $Q_{сум.індик.струм.3} = 0,26$ Вт.

Розрахунок припустимих параметрів силових струмоводів виконують, виходячи з умови:

$$Q_{сум.сил.струм.3} = \{\lambda_{сил.3} \times S_{сум.сил.струм.3} \times [T_{кож.} - T_{E2}]\} / L_{сил.3} \leq 20,04 \text{ Вт}, \quad (31)$$

де $L_{сил.3} = 0,4$ м.

В результаті $S_{сум.сил.струм.3} \leq 7,7 \times 10^{-5}$ м².

Розрахунками встановлено, що теплоприплив за індикаторним струмоводам є відносно малим, тож не впливає суттєво на тепловий баланс модулів МКС.

Більш суттєві припустимі параметри силових струмоводів за ділянками горловини:

$$\begin{aligned} S_{сум.сил.струм.1} &\leq 5,1 \times 10^{-6} \text{ м}^2; Q_{сум.сил.струм.1} \leq 0,66 \text{ Вт}; \\ S_{сум.сил.струм.2} &\leq 4,76 \times 10^{-4} \text{ м}^2; Q_{сум.сил.струм.2} \leq 33,4 \text{ Вт}; \\ S_{сум.сил.струм.3} &\leq 7,7 \times 10^{-5} \text{ м}^2, Q_{сум.сил.струм.3} \leq 20,04 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Отже, подана робота є підсумковою з циклу розробок щодо вирішення науково-технічних та конструкторсько-технологічних проблем з розробки систем криогенного забезпечення великогабаритних багатотонажних криомагнітних комплексів на базі мікрокриогенних систем замкнутого циклу. Робота базується на авторських патентах України № 103949 та № 88830 [1, 2] і роботі [3], а також на розробці СКЗ проекту комплексу КМК–1000 зі створення дослідно-промислового зразка з модернізації Придніпровської ТЕС для очищення пилувугільного палива. Проект призначено для відпрацювання конструкції та регламенту роботи комплексу з метою створення базової конструкції КМК як для подальшого впровадження на інших ТЕС, так і для промислових виробництв збагачування та очищення корисних копалин від шкідливих домішок методом високоградієнтної магнітної сепарації.

В розробці реалізовано низку важливих рішень: показано доцільність створення системи криогенного забезпечення на базі двох МКС замкнутого циклу; запропоновано схему конструкції СКЗ з відповідною конструкцією опор, екранів та ємностей, які одночасно є монолітною системою жорсткості та ефективного відводу теплоприпливів на відповідні ступені модулів МКС; розроблено конструкцію модуля горловини та модулів вводу двох МКС, а також спосіб ефективного використання холодопродуктивності МКС методом комплексного аналізу теплового балансу їхніх модулів з сумарним теплоприпливом до них з усіх систем конструкції СКЗ на всіх температурних рівнях; наведено розрахунки теплового балансу другої ступені модуля МКС РТ415/РТ415-РМ та модуля МКС АL 200, виконані з умови десятивідсоткового запасу відносно їхнього хо-

лодопродуктивності. При цьому параметри силових струмоводів є розрахункові максимально припустимі. Фактично ж на верхній та середній ділянці горловини вони можуть бути значно меншими, а нижню частину ділянки кожного силового струмоводу корисно шунтувати надпровідним кабелем.

В роботі показано ефективність функціонування СКЗ в стаціонарному режимі з надмалим запасом зрідженого гелію в ємності по кільцевому фізичному процесу «рідина—газ—реконденсація», що функціонує безперервно і не потребує жодних зовнішніх дій. Тож принциповим є те, що у процесі теплообміну газорідинна суміш гелію є постійним ідеальним холодопроводом на реконденсатор від всіх елементів ємності та НМС, незалежно від їхньої складності та розташування. До цього слід додати те, що нижня частина соленоїда в ємності знаходиться у зрідженому гелії, а краплі конденсату падають на нього з реконденсатора, розташованого у верхній частині, безпосередньо по контуру ємності та соленоїда. Все разом виключає градієнт температури в мідній ємності, а відповідно, й перегрів соленоїда НМС та перехід його в нормальний стан.

Загалом, наведена розробка докорінно знімає проблему безпеки, навіть у разі миттєвого викиду надмалої кількості газорідинної сумі-

ші гелію з будь-яких причин. З метою індикації стану всіх систем та запобігання аварійної ситуації в систему управління котлоагрегатом інтегровано автоматизовану систему контролю роботи СКЗ, також з метою запобігання можливого нагрівання труби отвору кожуха кріостата, її виготовлено з міді, а торці з'єднано теплопроводом з плитами зовнішнього магнітного екрана кімнатної температури.

Запропонована конструкція СКЗ забезпечує простоту технології виготовлення і, що суттєво важливо, простоту регламентних робіт у промислових умовах ТЕС, навіть з можливою зміною модуля горловини та і модулів МКС без розгерметизації вакуумної порожнини кріостата.

Розробка та створення СКЗ комплексу КМК є особливо складною науково-технічною та конструкторсько-технологічною проблемою. В Україні аналогічні розробки такого масштабу і науково-технічного рівня не відомі.

Велика вдячність технологу з вакуумної техніки та криогенного приладобудування Демішеві М.О. за беззаперечний творчий внесок і сприяння виконанню всього комплексу робіт з рішення конструкторсько-технологічних проблем розробки та створення кріостатів, криогенних установок та криомагнітних комплексів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Патент України № 103949. Демішев А.Г. Система криогенного забезпечення на базі криорефрижераторів замкнутого циклу великогабаритного багатотоннажного криомагнітного комплексу.
2. Патент України № 88830. Демішев А.Г. Консолідований спосіб роботи кріосистеми «газ—рідина—реконденсація» на базі криорефрижератора.
3. Демішев А.Г. *Исследование теплообмена в горловине, методика расчета и разработка криостатов и комплексных криогенных систем*: автореф. дис... канд. техн. наук. Харьков, 1980. 22 с.
4. Перечень таблиц стандартных справочных данных (ТССД). URL: https://thermophysics.ru/pdf_doc/GSSSD.pdf (дата звернення: 26.12.2019).

Стаття надійшла до редакції / Received 26.02.19

Статтю прорецензовано / Revised 24.07.19

Статтю підписано до друку / Accepted 16.09.19

Demishev, A.G.

Galkin Donetsk Physical-Technical Institute, the NAS of Ukraine
46, Nauki ave., Kyiv, 03028, Ukraine,
+380 44 524 04 80, donfti.nanu@ukr.net

SYSTEM OF CRYOGENIC SUPPLY OF CRYOMAGNETIC
COMPLEX KMK – 1000 ON THE BASIS OF MICRO-CRYOGENIC
SYSTEMS OF CLOSED CICLE

Introduction. The development of the enrichment industry has identified significant requirements for the development of new technologies and equipment, including the method of magnetic separation.

Problem Statement. Advantages of cryomagnetic separation complexes are determined by the efficiency of solving the problem of creating their cryogenic support systems.

Purpose. The purpose of this research is to develop a cryogenic supply system (CSC) by solution scientific technical and design and technological problems of cryomagnetic systems creation based on micro-cryogenic closed cycle systems (MCS).

Materials and Methods. The material of the research is the design of SCS with built-in superconducting magnetic system (SMS) and two MCS. The efficiency of MCS use is determined by the method of thermal balance analysis of their modules.

Results. SCS design on the basis of the nitrogen-free cryostat with integrated SMS and two close-cycle MCS and the solution of R&D problems of effective use of the MCS by method of the heat balance analysis of their modules have been proposed. The input units of the MCS modules and neck, as well as the tank, supports and screens are design in such a way as they can operate simultaneously as a system of rigidity and a system of efficient removal of heat from them to the appropriate stages of the MCS modules. The design of SCS provides operation in a stationary mode with a super small supply of liquid helium through the liquid-gas recondensation ring process, in which the gas-liquid helium mixture is an ideal cool conductor. The design of the SCS provides the manufacturability of routine maintenance, even with the change of the modules of the neck and the MCS, without depressurization of the cryostat.

Conclusion. Solutions of design and technological, research and technical problems are based on patents of Ukraine No. 103949 and No. 88830. The expediency of creation of the complex on the basis of a nitrogen-free cryostat with built-in SMS and two MCS operating in a stationary mode with a very small reserve of liquid helium has been substantiated.

Keywords: cryomagnetic complex, cryogenic supply system for cryomagnetic complex.