

УДК 664.72.004:504

## РОЗРОБКА МОБІЛЬНОГО ОХОЛОДЖУВАЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ НА ОСНОВІ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ РОБОЧИХ ТІЛ

**О.С. Тітлов**, доктор техн. наук, **С.М. Петушенко**, інж.  
*Одеська національна академія харчових технологій*  
**С.М. Кудашев**, канд. техн. наук,  
*Одеський державний аграрний університет*

*Приведені результати аналізу термодинамічних циклів парокомпресійних на екологічно безпечних холодильних агентах і тепловикористовуючих холодильних машин для роботи у складі мобільних комплексів охолодження зерна*

**Ключові слова:** охолодження зерна, холодильні машини, екологічна безпека

**Вступ.** Розробка охолоджувальних мобільних комплексів, дозволить здійснювати безпосередню холодильну обробку сільськогосподарської сировини безпосередньо в місцях його заготівлі і сприяє підвищенню якості і тривалості термінів зберігання. Особливо це завдання актуальне для різних зернових продуктів. Метод охолодження зерна штучно охолодженим повітрям дозволяє зберігати зерно і насіння олійних культур з підвищеною вологістю протягом довгого часу. Крім того, що метод зберігає якість зерна і є екологічно чистим, він дозволяє зменшити енерговитрати в 2-4 рази в порівнянні з використанням традиційної сушки зерна.

**Проблема.** Вирішення задач низькотемпературного зберігання зерна пов'язане з розробкою мобільних транспортних холодильників з холодильною потужністю від 50 кВт і вище. В даний час розробки такого типу холодильного обладнання в Україні відсутні. При цьому фактично єдиний вітчизняний виробник такого обладнання "Рефма" (Мелітополь) не повною мірою вирішує проблеми переходу на екологічно безпечні робочі тіла, дозволені до використання світовою спільнотою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ідея використання штучного холоду не нова і вже давно застосовується за кордоном в США, Німеччині, Японії, Австралії і інших високорозвинутих країнах. Фахівці Німеччини і Чехії підрахували, що використання штучного холоду для зберігання зерна підвищеної вологості економічніше в порівнянні з сушкою на 25...30 %. У Японії, завдяки охолодженню, тривалість зберігання рису збільшилася в 2 рази і складає 2 року. Враховуючи, що

Австралія велика кількість зерна експортує в Європу, то для боротьби з шкідниками зерна замість традиційної хімічної обробки вимушена була перейти на екологічно чисті прийоми боротьби з шкідниками - застосування штучного холоду в процесі зберігання. У Російській Федерації були зроблені спроби використання штучного холоду для зберігання рису в Краснодарському краю (Холмськ, Слов'янск, Красноармейськ). В середині 90 – х років в Україні на Тростянецьком ХПП упроваджена мобільна (на пересувній платформі) холодильна установка ТХУ-50-2-0 (холодопродуктивністю 37000 ккал /ч) для охолодження зерна в типовому складі ємкістю 3200 тонн за допомогою повітря [1]. Німеччина щорік охолоджує у себе і в інших країнах до 70 млн. тонн зерна. Зокрема, фірма "GRANIFRIGOR" випускає пересувні (мобільні) холодильні установки параметричної лави – з холодильною потужністю: 9,46; 15,68; 32,70; 65,4; 107,00 кВт. У проспекті фірми наданні дані про тривалість зберігання зерна в залежності від початкової вологості і температури зберігання (таблиця 1) [2]

Таблиця 1. Дані фірми "GRANIFRIGOR"

Початкова вологість, %	Насінне зерно		Продовольче зерно		Фуражне зерно	
	Тем-ра зберігання, °С	Тривал. зберігання	Тем-ра зберігання, °С	Тривал. зберігання	Тем-ра зберігання, °С	Тривал. зберігання
12-15	9-12	необмеж.	10-12	необмеж.	10-12	необмеж.
15-16,5	8-10	1-1,5 років	9-10	необмеж.	9-10	необмеж.
16,5-18	5	4-6 міс.	8-10	5-10 міс.	8-10	6-13 міс.
18-20	5	2-3 міс.	8-10	2-7 міс.	9-10	3-9 міс.
20-22	5	3-4 тиж.	6-8	4-16 тиж.	6-8	5-20 тиж.

Зниження вологості зерна при його охолодженні досягається внаслідок підсушування повітря за рахунок виморожування вологи - при зниженні температури на 10 °С зниження вологості складає ~ 0,5...1,0 % [3]. Охолоджене сухе зерно не підвладне самосогріву, в нім не

розвиваються шкідники, відпадає необхідність його переміщення з однієї ємкості в іншу, що викликає появу відходів, додаткову витрату електроенергії, а також приводить до зносу обладнання. Насінне зерно при його охолодженні краще зберігає схожість, але при цьому повинні дотримуватися дві умови: вологість зерна не повинна перевищувати 18 %, а температура охолодження не має бути нижче 5 °С. При охолодженні в порівнянні з традиційною сушкою зерно виходить екологічно чистим, виключена денатурація білка, забруднення зерна вуглеводнями, сажею, окислами сірі і азоту, важкими металами, нітритом і нітратами. Особливо важливим є застосування штучного холоду для зберігання олійних культур. Таким чином, застосування штучного холоду при зберіганні зернових покращує смакові і хлібопекарні достоїнства зерна, забезпечує постачання населення здоровішою їжею, тим паче, що хліб, крупа і мучні вироби є основними продуктами харчування країн СНД.

**Мета досліджень:** Теоретичний аналіз основних холодильних циклів з урахуванням особливостей експлуатації.

**Результати досліджень:** Комплексне використання штучне охолодженого повітря при зберіганні зерна і теплоти, що виділяється при цьому в конденсаторі, для підігріву, підсушування зерна або опалення теплиць, приміщень є ідеєю нині покійного академіка Міжнародної академії холоду В.Ф. Чайковського. Нами пропрацьовані схеми охолодження зерна в типових зернових складах з використанням поперечних і повздовжних каналів. Пропрацювали варіанти охолодження зерна в елеваторах з використанням силосів і ємкостей над- і підсепараторних, тобто вирішується питання очистки і охолодження зерна в потоці. Зниження енерговитрат досягається внаслідок того, що установка працює в режимі теплового насоса, а це дозволяє не тільки охолоджувати зерно, але і негодяще тепло надалі використовувати для екологічно чистої сушки зерна, наприклад: для підігріву у разі використання як насінного матеріалу або у разі переробки на борошномельних і круп'яних заводах; опалювання приміщень, теплиць і так далі. Очевидно, що однією з основних вимог, що пред'являються до систем охолодження, є енергетична ефективність. Так, наприклад, в Холмське не знайшли подальшого застосування розсоли холодильні машини, що мають високу енергоемність. З урахуванням необхідної холодильної потужності і масогабаритних характеристик, в мобільних системах охолодження зерна найбільші перспективи мають парокompресійні холодильні машини (ПКХМ) і газові (повітряні) холодильні машини (ГХМ). До переваг ГХМ відносять відсутність проблем з робочим тілом – повітря вибухопожежобезпечне і може подаватися безпосередньо в охолоджувані приміщення. ГХМ прості в експлуатації і не роблять вплив на озоновий шар атмосфери. До недоліків ГХМ відносять низьку енергетичну ефективність при роботі на температурному рівні мінус 30 ... мінус 20 °С.

Так, наприклад, при температурі мінус 30 °С дійсний холодильний коефіцієнт ПКХМ вищий, ніж ГХМ в 2,1-2,9 разу. Проблеми використання ПКХМ в системах охолодження зерна пов'язані з переходом на озонобезпечні робочі тіла – холодагенти. В даний час пропонується цілий спектр заміників традиційного холодагенту ПКХМ – R12 [4], у тому числі і природними, наприклад, аміаком [5]. Для визначення перспектив використання традиційних і нових холодагентів в системах охолодження в зернових господарствах проведений термодинамічний аналіз циклів ПКХМ. Характеристики холодагентів, які використовуються для аналізу, приведені в таблиці. 2.

Таблиця 2. Термодинамічні властивості холодагентів, які використовуються для аналізу циклів ПКХМ

Номер холодагенту	Хімічна формула, склад, торгівельна марка	$\mu$	$t_{s'}$	$ODP$	$GWP$
R22	CHClF <sub>2</sub>	86,47	-40,8	0,05	1700
R134a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	102,03	-26,1	0	1300
R404A	R125/143a (44/52/4)-HP62 Fx-70	97,60	-46,5	0	3850
R407C	R-32/125/134a (23/25/52)-Klea 61	86,20	-43,6	0	1370
R410A	R-22/125 (50/50)--AZ-20	72,59	-51,4	0	1370
R507A	R-125/143a (50/50)-AZ-50	98,86	-46,7	0	3900
R717	NH <sub>3</sub>	17,03	-33,3	0	<1
Примітка: $\mu$ - молекулярна маса, кг/кмоль; $t_{s'}$ - нормальна температура кипіння, °С; $ODP$ - потенціал руйнування озонowego шару; $GWP$ - потенціал глобального потепління.					

Розрахунок циклу ПКХМ проведений для таких умов.

Температура кипіння холодагенту прийнята з врахуванням оптимального рівня температур зберігання зерна (5 °С і 10 °С [1]), температурного напору між зерном і охолодженим повітрям (10 °С і перепаду температур в типовому повітроохолоджувачі (10 °С [6]), тобто - мінус 15 °С і мінус 10 °С. Температура конденсації холодагентів (40 °С)

прийнята з врахуванням експлуатації ПКХМ при температурі навколишнього середовища 32 °С і перепаду температур в типовому повітряному конденсаторі (8...10 °С [6]) . Перепад температур в регенеративному теплообміннику (РТО) прийнятий 20 °С. В схемі з R717 РТО відсутній. Результати розрахунку енергетичних характеристик таких циклів ПКХМ приведені в таблиці. 3.

Таблиця 3. **Енергетичні характеристики циклів ПКХМ при різних температурах кипіння**

Номер холодагенту	$q_0$	$l$	$\varepsilon$	$\eta$
R22	168 (170)	44(38)	3,82(4,47)	81,4(85,0)
R134	152 (154)	41(39)	3,71(3,95)	79,1(75,1)
R404A	115(118)	39(34)	2,94(3,47)	62,9(66,0)
R407	160(162)	49(43)	3,27(3,77)	69,6(71,6)
R410	167(172)	55(55)	3,04(3,13)	64,7(59,5)
R507	112(116)	40(39)	2,80(2,94)	59,7(56,5)
R717	1047(1053)	278(242)	3,77(4,35)	80,3(82,7)

Примітка: 1 – в дужках вказані характеристики для температури кипіння холодагенту мінус 10 °С;  
 2 – Позначення:  $q_0$  - питома холодопродуктивність, кДж/кг;  $l$  - питома робота стискування, кДж/кг;  $\varepsilon$  - розрахунковий холодильний коефіцієнт циклу;  $\eta$  - ступінь термодинамічної досконалості %.

Аналіз результатів, наведені в таблиці 3, показує, що найбільші перспективи в мобільних системах охолодження зерна має природний холодагент – аміак, що володіє до того ж чудовими екологічними характеристиками. Не дивлячись на те, що в даний час найбільшого поширення набули мобільні холодильні установки з парокомпресійними холодильними агрегатами [1,7], певні перспективи мають і розсолні тепловикористуючі абсорбційні холодильні машини (АХМ) і

пароежекторного типу (ПЕХМ) [8]. У АХМ і ПЕХМ реалізується два цикли: прямий і зворотній. У прямому циклі теплова енергія перетворюється в механічну, а в зворотному циклі механічна енергія використовується для виробництва штучного холоду. У цих установках прагнуть використовувати тепло низького потенціалу, зокрема, теплоту вихлопних газів двигунів внутрішнього згорання, скидного тепла газотурбінних установок і котельних агрегатів. Електроенергія в АХМ і ПЕХМ витрачається лише на привід перекачуючих, циркуляційних і розсолів насосів і в системах автоматики. У АХМ частка електроенергії в сумарному підведенні енергії складає від 0,5 % (бромистолітєві установки [9]) до 2,3 % (водоаміачні [10]). У ПЕХМ ця величина складає ~ 0,6 %.

Бромистолітєві АХМ забезпечують охолодження об'єктів від 6 до 12 °С з тепловим коефіцієнтом від 0,64 до 0,69 [9]. В даний час серійно випускаються бромистолітєві АХМ з холодопродуктивністю від 300 до 5000 кВт з джерелами енергії у виді [9,11]: пара (надмірний тиск від 0,05 до 0,07 МПа); гарячої води (температура від 85,0 до 90,5 °С); природного газу і топкового мазуту. Тепловий коефіцієнт серійних ПЕХМ в діапазоні температур охолодження від плюс 4 до плюс 8 °С складає 0,06 і 0,13, відповідно, холодопродуктивністю змінюється від 350 кВт до 1150 кВт [8].

Для порівняння з тепловикористуючими холодильними машинами візьмемо сучасну велику аміачну ПКХМ з компресором П220. У зв'язку з тим, що у всіх випадках мають місце енерговитрати на прокачування розсолу і води, що охолоджує, враховуватимемо лише затрати механічної енергії для виробництва штучного холоду: у ПКХМ – на привід компресора; у тепловикористуючих – на привід перекачуючих насосів.

Холодильний коефіцієнт ПКХМ при температурі охолодження (кипіння) плюс 5 °С і температурі навколишнього середовища (конденсації холодагента) 30 °С складає 7,5, холодопродуктивність – 650 кВт [6]. Розрахунки показують що, в ПКХМ витрати електроенергії на виробництво одиниці штучного холоду, наприклад, 1 кВт, складає 0,13 кВт; у бромистолітєвих АХМ – 0,008 кВт, водоаміачних АХМ – 0,04 кВт; ПЕХМ – 0,1 кВт. Ці результати розрахунків говорять про те, що за наявності скидних джерел теплової енергії експлуатаційні витрати тепловикористуючих холодильних машин значно нижчі, ніж в ПКХМ.

Перевагою ПЕХМ і АХМ великої холодопродуктивності є і те, що вони менш громіздкі, ніж відповідні ПКХМ. Слід також відзначити, що у зв'язку із зростанням вартості нового холодильного обладнання на базі ПКХМ на озонобезпечних хладагентах, застосування дешевих екологічно чистих тепловикористуючих апаратів представляється перспективним вже найближчим часом. Великий інтерес викликають і ПЕХМ на озонобезпечному R134a. Ці установки забезпечують можливість використання низькопотенційного тепла на рівні температур плюс 70 °С, конструкції їх компактніші, а тиск в системі підтримується вище

атмосферного, що виключає підсос повітря у випарник. Ефективність використання мобільних холодильних установок визначається інтенсивністю процесів теплообміну між холодним повітрям і зерном.

У сучасних сховищах – силосах товщина зернового шару складає, не менше, 10 метрів, діаметр - 3 ...5 метра. При традиційному рішенні (подача охолодженого повітря в нижню частину силосу) виникають проблеми рівномірного розподілу повітряного потоку за об'ємом зернового шару. Ця проблема може бути успішно за допомогою вискоєфективних двофазних теплових систем, наприклад, термосифонів, вбудованих до складу конструкції силосу.

**Висновки.** З врахуванням приведених результатів порівняльного аналізу, а також відомих переваг тепловикористовуючих холодильних машин в частині екологічної безпеки, можна рекомендувати їх як мобільні холодильні установки на елеваторах і зерноскладах України і країн СНД.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Петруня Б.Н., Титлов А.С., Кудашев С.Н. Перспективы использования холодильных систем для хранения зерна // Хранение и переработка зерна. –2002. – № 12. – С. 33-34.
2. Станкевич Г.Н., Петруня Б.Н., Бичинюк И.И., Лищенко Ю.В. Консервация зерновой массы с использованием искусственно охлажденного воздуха // Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій. – Одеса: 2001. – Вып. 21. – С. 39-41.
3. Дмитрук Е.А., Петруня Б.Н. Использование искусственного холода при хранении зерна // Хранение и переработка зерна. – 2000. – № 10. – С. 27-28.
4. Богданов С.Н., Бурцев С.И., Иванов О.П., Куприянова А.В. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справочник / Под ред. С.Н. Богданова. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГАХПТ, 1999. – 320 с.
5. Железный В.П., Жидков В.В. Эколого-энергетические аспекты внедрения альтернативных хладагентов в холодильной технике. – Донецк: Донбас, 1996. –144 с.
6. Железный В.П., Железный П.В., Лысенко О.В., Овчаренко В.С. Эколого – термoeкономический анализ перспектив применения аммиака в холодильном оборудовании // Холодильная техника. – 2000. – № 3. – С. 12-16.
7. Чумак И.Г., Никульшина Д.Г. Холодильные установки. Проектирование. – К.: Выща шк., 1988. – 280 с.
8. Загоруйко В.А., Голиков А.А. Судовая холодильная техника /Под общ. ред. В.А. Загоруйко. –К.: Наукова думка, 2000. – 607 с.

9. Богданов А.И. Абсорбционные бромисто-литиевые холодильные машины «ОКБ Теплосибмаш» // Холодильная техника. – 2002. – № 10. – С. 16.
10. Бадылькес И.С., Данилов Р.Л. Абсорбционные холодильные машины, – М.: Пищевая промышленность, 1996. – 356 с.
11. Абсорбционные холодильные машины компании Dunham-Bush International // Холодильная техника. – 2000. – № 11. – С. 23-25.

## РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО ОХЛАЖДАЮЩЕГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ РАБОЧИХ ТЕЛ

А.С. Титлов, С.Н. Петушенко, С.Н. Кудашев

**Ключевые слова:** охлаждение зерна, холодильные машины, экологическая безопасность.

### Резюме

*Приведены результаты анализа термодинамических циклов парокompрессионных на экологически безопасных холодильных агентах и теплоиспользующих холодильных машин для работы в составе мобильных комплексов охлаждения зерна.*

## DEVELOPMENT OF MOBILE COOL COMPLEX ON BASIS ECOLOGICALLY SAFE WORKINGS BODIES

A.S. Titlov, S.N. Petushenko, S.N. Kudashev

### Summary

**Keywords:** cooling of grain, refrigeration machines, ecological safety

*The results of analysis of thermodynamics cycles of parokompрessionnykh are resulted on ecologically safe refrigeration agents and teploispol'zuyuschikh of refrigeration machines for work in composition the mobile complexes of cooling of grain.*