

УДК 664.723:697.9
DOI: 10.15587/1729-4061.2015.44251

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ПЕРВИЧНОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ОБРАБОТКИ И ХРАНЕНИЯ ЗЕРНА МЕЛКОСЕМЕННЫХ КУЛЬТУР

С. Н. Петушенко

Старший преподаватель
Комиссия холода
Одесский технический колледж
Одесской национальной академии
пищевых технологий
ул. Балковская, 54, г. Одесса, Украина, 65006
E-mail: sergeinp1965@mail.ru

А. С. Титлов

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
Кафедра теплоэнергетики и
трубопроводного транспорта энергоносителей
Одесская национальная академия
пищевых технологий
ул. Канатная, 112, г. Одесса, Украина, 65039
E-mail: titlow@mail.ru

Проведено аналіз різних аспектів холодильного зберігання зерна на елеваторах України, країн СНД і в світі. Показано перевагу холодильного способу, як в частині якості, так і в частині енергозбереження. Проведено порівняльний аналіз різних типів холодильних машин, що працюють на озонобезпечних холодоагентах. Показано, що за наявності скидного тепла економічно вигідніше застосування тепловикористовуючих холодильних машин

Ключові слова: зберігання дрібнонасінева зерна, холодильні системи, теплообмін нерухомого шару, системи первинної холодильної обробки

Проведен анализ различных аспектов холодильного хранения зерна на элеваторах Украины, стран СНГ и в мире. Показано преимущество холодильного способа, как в части качества, так и в части энергосбережения. Проведен сравнительный анализ различных типов холодильных машин, работающих на озонобезопасных хладагентах. Показано, что при наличии бросового тепла экономически выгоднее применение теплоиспользующих холодильных машин

Ключевые слова: хранение мелкозернового зерна, холодильные системы, теплообмен неподвижного слоя, системы первичной холодильной обработки

1. Введение

Зерно – это один из важнейших основных продуктов питания человека, для выращивания и сбора которого привлекаются обширные ресурсы. По данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, в мире ежегодно портится около 20 % собранных зерновых [1]. Основная задача хранения зерна – сохранить зерно без потерь в массе или с минимальными потерями.

Потери, обусловленные ухудшением качества хранящегося зерна, приводят и к количественным потерям. Как показал многолетний опыт в технологии первичной обработки свежесобранного зерна, одной из актуальных задач является его охлаждение до температур, обеспечивающих безопасное хранение. Многочисленными физиологическими, биохимическими и технологическими исследованиями установлено, что понижение температуры зерна ниже 8...10 °С резко снижает интенсивность физиолого-биохимических процессов, способствует сохранению исходного качества зерна и увеличивает сроки его хранения как при длительном хранении зерна, так и при его временном

хранении до возможной дополнительной обработке в сушилке [2].

Таким образом, проблема разработки систем первичной холодильной обработки мелкозернового зерна являются актуальными.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

При выборе способа первичной обработки зерна холодом при температуре 8...10 °С технологи принимают во внимание факторы качества, минимизации потерь, экономии финансовых затрат, трудозатрат и энергозатрат, экологические моменты [2–9].

Повышение качества хранимого зерна при низких температурах связано с устранением благоприятных условий для развития плесневых грибов [3–5] и, следовательно, исключением химической обработки зерна [6].

Минимизация потерь зерна при низкотемпературном хранении определяется снижением жизнедеятельности насекомых при температуре ниже 13 °С – насекомое

мые впадают в спячку и не приносят вреда хранимому зерну (рис. 1) [4, 5].

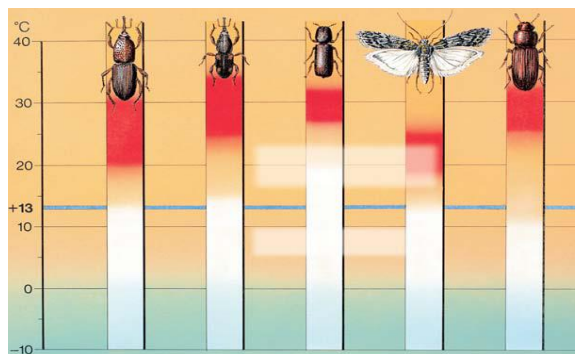


Рис. 1. Влияние температурных режимов зерна на жизнедеятельность насекомых-вредителей

Экономия финансовых затрат, трудозатрат и энергоресурсов при низкотемпературном хранении зерна связано с тем, что:

а) охлаждающие комплексы можно размещать непосредственно в местах сбора урожая и исключить потери зерна при перескладировании (достигают 0,03 % общего количества [7] и сэкономят на технологических транспортных установках [8];

б) зерно и семена масличных культур с повышенной влажностью хранятся при температуре 8...10 °С без ухудшения качества на протяжении длительного времени (табл. 1), а это позволяет снять остроту проблемы сушки в период сбора урожая [2].

Таблица 1

Продолжительность хранения зерна в зависимости от исходной влажности и температуры хранения [9]

Исходная влажность, %	Семенное зерно		Продовольственное зерно		Фуражное зерно	
	Температура хранения, °С	Продолжительность хранения	Температура хранения, °С	Продолжительность хранения	Температура хранения, °С	Продолжительность хранения
12...15	9...12	неогран.	10...12	неогран.	10...12	неогран.
15...16,5	8...10	1...1,5 года	9...10	неогран.	9...10	неогран.
16,5...18	5...7	4...6 мес.	8...10	5...10 мес.	8...10	6...13 мес.
18...20	5	2...3 мес.	8...10	2...7 мес.	9...10	3...9 мес.
20...22	5	3...4 нед.	6...8	4...16 нед.	6...8	5...20 нед.

Экологический положительный аспект способа низкотемпературного хранения связан с тем, что из технологического процесса исключается высокотемпературная сушка смесью топочных газов и воздуха и, соответственно, устраняется возможность загрязнения канцерогенными веществами, например, бензапиреном. Охлажденное зерно не содержит углеводов, сажу, окислы серы и азота, тяжелые металлы, нитриты и нитраты [2] и не требует дополнительных расходов на очистку.

Технологии применения искусственного холода применяются во многих странах мира – в США, Германии, Японии, Австралии, Бразилии [2]. Так, например, Германия широко применяет технологию низкотемпературной обработки зерна – ежегодно охлаждается до 70 млн. тонн зерна [9].

Для обслуживания подавляющего числа потребителей в мире транснациональная корпорация "GRANIFRIGOR" выпускает передвижные холодильные установки на базе парокомпрессионных холодильных агрегатов. Передвижные холодильные агрегаты осуществляют периодическое охлаждение силосов путем продувания столба зерна охлажденным воздухом.

В середине 90-х годов в Украине на Тростянецком ХПП внедрена мобильная (на передвижной платформе) холодильная установка ТХУ-50-2-0 (холодопроизводительность 37000 ккал/ч) для охлаждения зерна в типовом складе емкостью 3200 тонн при помощи воздуха [4].

Известен опыт применения и стационарных охлаждающих установок в Российской Федерации [2, 4] для хранения риса, который не получил дальнейшего распространения.

Следует отметить, что среди всех типов зерновых продуктов особый интерес для низкотемпературной сушки представляют сорта мелкого зерна (рапс, лен, просо, горчица, амарант и др.). Они из-за незначительного характерного линейного размера наиболее подвержены повреждению при сушке нагревом [2].

Для такого типа зерна нет стандартного охлаждающего оборудования, так как процессы теплообмена и гидравлические режимы при продувке неподвижного слоя мелкосемянного зерна охлажденным воздухом в настоящее время не изучены.

3. Цель и задачи исследования

Целью настоящего исследования является оценка перспектив применения различных типов холодильных машин для низкотемпературного хранения зерна и разработка таких систем для мелкосемянного зерна.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

- провести оценку перспектив применения различных типов холодильных машин для низкотемпературной обработки мелкосемянного зерна;
- провести экспериментальные исследования процессов теплообмена в условиях низкотемпературной обработки мелкосемянного зерна;
- разработать перспективные схемы систем охлаждения для первичной низкотемпературной обработки и хранения зерна мелкосемянных культур.

4. Анализ перспектив применения различных типов холодильных машин в системах низкотемпературной обработки мелкосемянного зерна

Область применения стационарных холодильных машин – крупные элеваторы с длительным низкотемпературным хранением зерна, а мобильных – небольшие хранилища с кратковременным сроком хранения, в том числе и в местах заготовки [9].

Таблица 3

Расчетные значения энергетических характеристики циклов ПКХМ при различных температурах кипения

Номер хладагента	q_0	l	ϵ	η
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)

Примечание: 1 – в скобках указаны характеристики для температуры кипения хладагента – минус 10 °С; 2 – Обозначения: q_0 – удельная холодопроизводительность, кДж/кг; l – удельная работа сжатия, кДж/кг; ϵ – расчетный холодильный коэффициент цикла; η – степень термодинамического совершенства, %

Предварительный анализ показал [2], что перспективы применения в мобильных системах охлаждения зерна могут иметь парокомпрессионные холодильные машины (ПКХМ) и газовые холодильные машины (ГХМ).

К преимуществам ГХМ относят отсутствие проблем с рабочим телом-воздухом, они просты в эксплуатации и не оказывают техногенное воздействие на экосистему планеты.

К недостаткам ГХМ относят высокие массогабаритные параметры и низкую энергетическую эффективность [10].

Применение ПКХМ в системах охлаждения зерна связано в настоящее время с переходом на озонобезопасные хладагенты.

В настоящее время предлагается целый спектр заменителей традиционного хладагента ПКХМ – R12, в том числе и природными, например аммиака [11].

Для определения перспектив использования традиционных и новых хладагентов проведен термодинамический анализ циклов ПКХМ. Характеристики хладагентов, используемых для анализа, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Термодинамические свойства хладагентов, используемых для анализа циклов ПКХМ [12]

Номер хладагента	Химическая формула, состав, торговая марка	μ	t_s	ODP	GWP
R22	CHCLF ₂	86,47	-40,8	0,05	1700
R134a	CH ₂ FCF ₃	102,03	-26,1	0	1300
R404A	R125/134a (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-125/134a (50/50)-AZ-50	98,86	-46,7	0	3900
R717	NH ₃	17,03	-33,3	0	<1

Примечание: μ – молекулярная масса, кг/кмоль; t_s – нормальная температура кипения; ODP – потенциал разрушения озонового слоя; GWP – потенциал глобального потепления

Расчет цикла ПКХМ проведен для следующих условий [13].

Температура кипения хладагентов принята с учетом оптимального уровня температур хранения зерна (5 °С и 10 °С), движущего температурного напора между зерном и охлажденным воздухом (10 °С) и перепада температур в типовом воздухоохладителе (10 °С), т. е. – минус 15 °С и минус 10 °С. Температура конденсации хладагентов (40 °С) принята с учетом эксплуатации ПКХМ при температуре окружающей среды 32 °С и перепада температур в типовом воздушном конденсаторе (8...10 °С). Перепад температур в регенеративном теплообменнике (РТО) принят 20 °С. В ПКХМ с R717, в качестве холодильного агента, РТО традиционно отсутствует.

Результаты расчета энергетических характеристик таких циклов ПКХМ приведены в табл. 3.

Анализ результатов, представленных в табл. 3, показывает, что наибольшие перспективы в мобильных системах охлаждения зерна имеет природный хладагент – аммиак, обладающий к тому же превосходными экологическими характеристиками.

Несмотря на широкое применение в настоящее время ПКХМ [9], можно говорить и об определенных перспективах теплоиспользующих холодильных машин абсорбционного (АХМ) и парорэжекторного (ПЭХМ) типа в стационарных системах охлаждения зерна [10]. АХМ и ПЭХМ используют, как правило, теплоту низкого температурного потенциала, например теплоту выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания, бросового тепла газотурбинных установок и котельных агрегатов.

Электрическая энергия в АХМ и ПЭХМ используется только для привода насосов и в системах автоматики, причем в АХМ в суммарном подводе энергии доля электричества составляет от 0,5 % (бромисто-литиевые установки [14]) до 2,3 % (водоаммиачные [14]), в ПЭХМ ~ 0,6 % [15].

Рассольные бромисто-литиевые АХМ обеспечивают охлаждение объектов до 6...12 °С с тепловым коэффициентом 0,64...0,69 [14].

Тепловой коэффициент серийных ПЭХМ в диапазоне температур охлаждения 4...8 °С составляет 0,06...0,13 при холодопроизводительности 350...1150 кВт [14].

Проведем сравнение ПКХМ с компрессором П220 и аммиаком в качестве холодильного агента.

Расчеты показывают, что холодильный коэффициент такой ПКХМ при температуре кипения 5 °С и температуре конденсации 30 °С составляет 7,5, а холодопроизводительность 650 кВт [16]. При этом в рассмотренном ПКХМ затраты электроэнергии на производство 1 кВт искусственного холода составляют 0,13 кВт; в бромистолитиевых АХМ – 0,008 кВт, водоаммиачных АХМ – 0,04 кВт; ПЭХМ – 0,1 кВт.

Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что при наличии бросовых энергоресурсов эксплуатационные затраты при работе всех типов теплоиспользующих холодильных машин (АХМ и ПЭХМ) ниже, чем у ПКХМ.

5. Экспериментальные исследования режимов низкотемпературной обработки мелкосеменных культур

Для решения этих задач проводились исследования на специально изготовленной лабораторной уста-

новке. Объектом исследований было выбрано зерно рапса [1].

Принципиальная схема экспериментальной установки изображена на рис. 2.

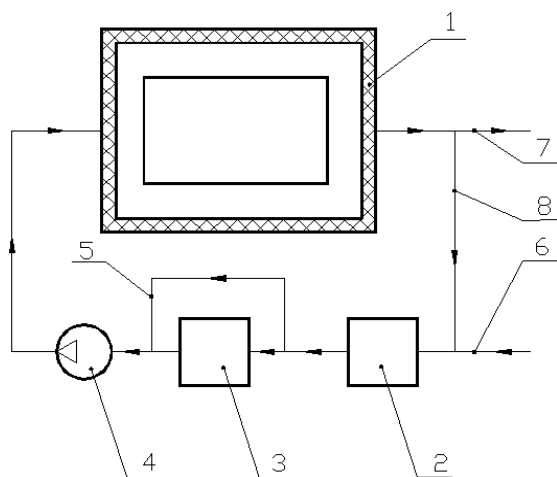


Рис. 2. Схема стенда для исследования режимов низкотемпературной обработки зерна мелкосеменных культур: 1 – холодильная камера; 2 – охладитель воздуха; 3 – нагреватель воздуха; 4 – вентилятор; 5 – обводной воздуховод; 6 – воздуховод подвода свежего воздуха; 7 – воздуховод отработанного воздуха; 8 – воздуховод рециркуляционного воздуха

Установка состоит из прямоугольного теплоизолированного ($\delta_{\text{из}}=30\text{ мм}$) корпуса 1 (1900×500 мм) высотой 570 мм, разделенного на два отделения перегородкой. Воздуховоды 2, соединяющие два отделения, выполнены из пластмассовых труб в виде конструкции «труба в трубе» межтрубное пространство заполнено пенополиуретаном. В одном отделении происходит термообработка воздуха перед подачей на охлаждение зерна. В другом отделении расположена экспериментальная ячейка 3, представляющая собой цилиндрический бункер высотой 370 мм, внутренний диаметр которого составляет 104 мм, теплоизолированный снаружи. В нижней части закреплена мелкая металлическая сетка 4 в виде сита, а верхняя открыта. Для визуализации уровня обрабатываемого мелкосеменного зерна в бункере сделано прозрачное окошко по высоте с мерной шкалой 5.

В нижнем воздуховоде установлен нагнетающий вентилятор 6 скорость вращения, которого регулируется с помощью ЛАТРа 7. Также установлен электрический нагреватель 8, который позволяет осуществлять подогрев воздуха идущего на термообработку зерна. Для охлаждения воздуха применяется агрегат типа ВС, который состоит из герметичного компрессора 9 с всасывающим вентиляем, ребристотрубного воздушного конденсатора с диффузором 10, ресивера с запорным жидкостным вентиляем 11, фильтра-осушителя 12, вентилятора с электродвигателем и трубопроводов, соединяющих компрессор, конденсатор, ресивер и фильтр-осушитель, смонтированных на стальной штампованной, плите. В комплект агрегата входит щит электрооборудования, состоящий из автоматического предохранителя АП и магнитного пускателя. Для автоматического регулирования работы компрессора используются терморегулирующий вентиль 13 типа

ТРВ-2М, реле давления типа РД-3-01, для визуального контроля над работой компрессора – манометр и вакуумметр. В качестве охлаждающего устройства используется оребренная змеевиковая батарея 14.

Для более точного поддержания температуры воздуха, который подается на обработку зерна, был установлен дополнительный холодильный агрегат 15 (холодопроизводительностью 150 Вт), в состав которого входит герметичный поршневой компрессор, ребристо-змеевиковый воздушный конденсатор, фильтр-осушитель. В качестве испарителя применена оребренная двухрядная змеевиковая батарея 16. Методика экспериментальных исследований заключалась в следующем.

Включалась холодильная машина и установка выходила на заданный температурно-влажностный режим.

Предварительно подготовленное зерно рапса, увлажненное и подогретое в термостате, помещалось в экспериментальную ячейку. Высота засыпки определялась мерной шкалой на прозрачном окошке соответственно 100 мм, 200 мм и 275 мм.

Взвешивалась масса самой ячейки, а затем вместе с зерном на электронных весах. Температура зерна определялась с помощью термометров сопротивления с цифровым выходом на электронный блок.

Ячейка устанавливалась в камеру, причем конструкция соединения ячейки с воздуховодом обеспечивало герметичное быстроразъемное соединение, не допускающее боковых перетечек воздуха при продувке зерна.

Скорость и расход воздуха измерялся на выходе экспериментальной ячейки. Для определения скорости и расхода воздуха использовался микроанометр типа ММН и дифференциальная трубка Пито. Время отслеживалось по секундомеру. Через каждые 60 с ячейка снималась и взвешивалась на электронных лабораторных весах, а также измерялась температура зерна в верхней части (на расстоянии 10 мм от края насыпи) и в средней части насыпи. После этого экспериментальная ячейка помещалась в камеру охлаждения и эксперимент продолжался.

В ходе проведения эксперимента также измерялась температура воздуха поступающего на охлаждение зерна и уходящего после термообработки.

Опыты проводились с одним и тем же сортом зерна, которое имело одинаковую начальную температуру и влажность. Скорость, расход и температура охлаждающего воздуха также были одинаковы во всех опытах. Каждый опыт заканчивался при достижении одинаковой температуры зерна вверху насыпи независимо от высоты слоя. Начальная и конечная влажность зерна определялась в лабораторных условиях на приборе СЕШ-3М.

Анализ уравнений описывающих процесс теплообмена между фильтрующимся газом и поверхностью частиц может быть описан в виде следующего критерияльного уравнения [17]:

$$Nu = a \cdot Re_s^b \cdot Pr^{0.33},$$

где a, b – эмпирические коэффициенты, определяемые

экспериментально; $Re_s = \frac{4\Phi Re}{6(1-\epsilon)}$; $Re_s = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\mu}$, v – истинная скорость газа, м/с; $\Phi = \frac{\pi d^2}{4S}$ – коэффициент

сферичности частиц объемом $V = \frac{\pi d^3}{6}$ и миделевым сечением S .

Для расчета конвективного теплообмена зернистого материала и холодного воздуха было использовано уравнение

$$Nu = 2(1 + 0.276 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}). \tag{1}$$

Критериальное уравнение (1) дополнили симплексом $\frac{d}{h}$, который учитывает высоту загрузки (h) и диаметр слоя (d).

Общий вид уравнения описывающего процесс охлаждения зерна шаровидной формы, к которому относится и исследуемое зерно рапса, можно представить в виде:

$$Nu = 2 + a \cdot Re_0^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{d}{h}\right)^b, \tag{2}$$

где Nu – число Нуссельта, $Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$; Pr – число Прандтля, $Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda}$; α – коэффициент теплообмена от дви-

жущегося холодного воздуха к зерну, Вт/(м²·К); λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; c – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); d – эквивалентный диаметр канала, м; a, b – эмпирические коэффициенты, которые необходимо определить экспериментально.

Для определения неизвестных коэффициентов в уравнении (2) была применена известная методика [19].

Получено уравнение для определения коэффициента конвективного теплообмена при холодильной обработке зерен рапса:

$$Nu = 2 + 0.2 \cdot Re_0^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \cdot \left(\frac{d}{h}\right)^{1.423}. \tag{3}$$

Диапазон изменения симплекса: $1,1 \leq \left(\frac{d}{h}\right) \leq 0,37$. На

рис. 3 приведено сравнение результатов экспериментальных исследований и полученных по уравнению (3).

Относительная погрешность определения коэффициента теплообмена не превышает 10 % (рис. 3), что позволяет использовать уравнение (2) для проектирования систем первичной холодильной обработки мелкосеменного зерна.

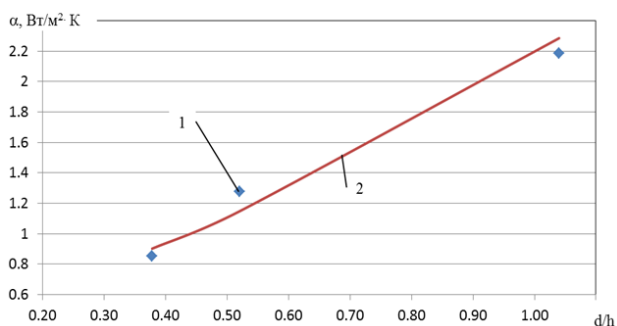


Рис. 3. График изменения коэффициента теплообмена от воздуха к слою зерна: 1 – эксперимент, 2 – расчет

6. Технические предложения по конструкциям систем первичной низкотемпературной обработки мелкосеменных культур

На основе полученных экспериментальных данных по теплообмену между охлажденным воздухом и зерном были проведены модельные исследования температурных и гидродинамических полей насыпи мелкосеменного зерна.

В основе математических моделей лежат известные положения по теплообмену воздушного потока и неподвижной насыпью зерна и распределения полей скорости в этих условиях [18–21].

Результатом моделирования стали два технических предложения.

6. 1. Система первичного охлаждения контейнерного типа

Охлаждаемый контейнер (рис. 4) [22] представляет собой ящик 1 с воздухонепроницаемыми наружными ограждениями без верхней крышки и с перфорированным днищем. На боковой стороне предусмотрен люк 2 для выгрузки зерна. К днищу контейнера присоединен неподвижно распределитель воздуха 3 в виде конуса, к которому, в свою очередь, на шарнирах (пружинах) 4 с помощью подвижного соединения 5 подключен воздухопровод 6.

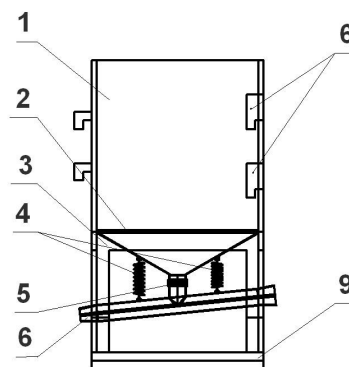


Рис. 4. Схема контейнера для первичного низкотемпературного охлаждения мелкосеменного зерна:

- 1 – корпус; 2 – люк для выгрузки зерна;
- 3 – распределитель воздуха; 4 – подвесные пружины;
- 5 – подвижное соединение; 6 – воздухопровод;
- 9 – установочная платформа

В боковых стенках предусмотрены направляющие 7 для плотного прилегания к рядом стоящему контейнеру. При этом конструкция соединения воздухопроводов друг с другом позволяет это производить автоматически при установке следующего рядом стоящего контейнера за счет муфты 8. Он дополнительно содержит платформу 9, на которой установлен.

Процесс осуществляется следующим образом. Контейнеры заполняются зерновой массой и устанавливаются в складе для хранения зерна. Причем первый контейнер присоединяется к общему распределительному воздухопроводу. Каждый последующий контейнер плотно прилегает к впереди стоящему, а воздухопроводы 6 автоматически соединяются в единую линию. Это обеспечивается направляющими 7, шарнирами (пружинами) 4 и специальной конструк-

цией муфты 8. Последний контейнер, устанавливаемый в ряду, имеет заглушку на конце воздуховода.

Количество рядов определяется размерами склада.

6. 2. Система охлаждения склада для напольного хранения влажного зерна мелкосеменных культур

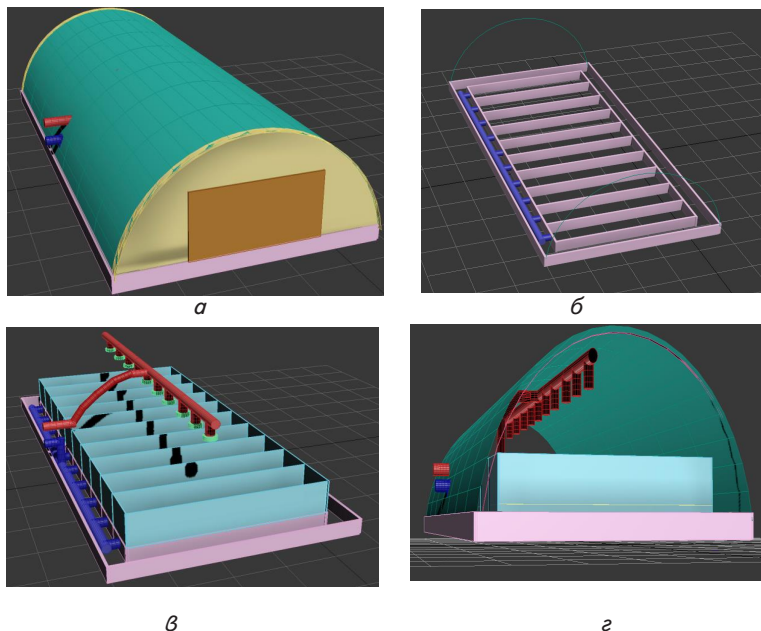


Рис. 5. Система охлаждения склада для напольного хранения влажного зерна мелкосеменных культур: а – общий вид; б – система распределения воздушных потоков; в – система отвода отработанного нагретого воздуха; г – вид со снятой торцевой перегородкой

Техническое предложение приведено на рис. 5, а–г.

Конструкцию предполагается устанавливать в местах непосредственной заготовки зерна. Зерно загружается в отдельные перегородки, в нижней части которых расположены каналы для подачи охлажденного воздуха.

Для недопущения просыпки зерна в нижней части перегородок установлены перфорированные решетки.

Отвод отработанного воздуха осуществляется воздуховодами из верхней части хранилища.

7. Обсуждение результатов разработки систем охлаждения для первичной низкотемпературной обработки и хранения зерна мелкосеменных культур

К достоинствам проведенного исследования можно отнести:

а) во-первых, проведенный анализ и обоснование перспектив способа низкотемпературной обработки и хранения зерна мелкосеменных культур, а также анализ типов холодильных машин, которые могут эффективно применяться в таких системах;

б) во-вторых, новизну результатов экспериментального исследования процессов теплообмена между холодным воздухом и неподвижной засыпкой мелкосеменного зерна (на примере рапса);

в) в-третьих, новые конструкции систем первичной низкотемпературной обработки мелкосеменных культур, которые могут быть использованы в сельских хозяйствах Украины.

К недостаткам работы можно отнести:

а) исследование мелкосеменного зерна только на примере рапса, что не позволяет обобщить результаты на другие культуры;

б) отсутствие в статье результатов математического моделирования тепловых и газодинамических режимов при холодильной обработке мелкосеменного зерна воздушным потоком.

Проведенные исследования полезны для разработчиков систем первичной низкотемпературной обработки мелкосеменных культур.

Разработанные системы первичной низкотемпературной обработки мелкосеменных культур смогут найти широкое применение в фермерских и крестьянских хозяйствах Украины, в первую очередь, из-за простоты изготовления и применения известных материалов и оборудования.

Представленная работа является новой и в дальнейшем в рамках госбюджетных и аспирантских исследований планируется ее продолжение.

8. Выводы

1. Проведенная оценка перспектив применения холодильных машин, реализующие различные способы получения искусственного холода показала, что:

а) в качестве стационарных холодильных установок на элеваторах и зерноскладах Украины и стран СНГ можно рекомендовать бромисто-литиевые и водоаммиачные АХМ (бромисто-литиевые и водоаммиачные) и ПЭХМ, причем в связи с высокой стоимостью стационарных систем на базе ПКХМ применение дешевых экологически чистых теплоиспользующих аппаратов представляется перспективным уже в ближайшее время;

б) наибольшие перспективы в мобильных системах охлаждения зерна на базе ПКХМ имеет природный хладагент – аммиак, обладающий к тому же превосходными экологическими характеристиками;

в) в ближайшей перспективе в системах охлаждения зерна стационарного типа могут быть использованы ПЭХМ с холодильным агентом R134a – они обеспечивают возможность использования низкопотенциального тепла на уровне температур плюс 70...80 °С, конструкции их компактны, а давление в системе поддерживается выше атмосферного, что исключает подсос воздуха в испаритель.

2. Проведенные экспериментальные исследования процессов конвективного теплообмена при продувке неподвижного слоя мелкосеменного зерна показали, что:

а) охлаждение зерна до 8...10 °С сопровождается частичным его осушением: для рапса – 1,13 %, для проса – 0,98 %, при этом максимальная интенсивность уноса влаги наблюдается вначале термообработки, так, например, при снижении температуры на 50 % от начальной температуры зерна унос влаги составляет для рапса – 90 %, проса – 80 %;

б) найденный эффект осушения зерна при его охлаждении позволяет исключить из технологической

цепочки процесс высокотемпературной сушки, а это не только сократит энергозатраты при хранении мелкосеменного зерна, но и повысит его качество.

3. На основе проведенного анализа и результатов экспериментальных исследований процессов конвективного теплообмена предложены две схемы системы

первичного охлаждения зерна – контейнерного (мобильного) и стационарного типа, каждая из которых может быть использована в фермерских и крестьянских хозяйствах Украины в зависимости от объема перерабатываемой продукции.

Литература

1. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных наций (FAO) [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.fao.org/home/ru>
2. Петушенко, С. Н. Современное состояние техники и технологии низкотемпературной обработки и хранения зерна мелкосеменных культур [Текст] / С. Н. Петушенко // Холодильна техніка та технологія. – 2013. – № 2. – С. 71–74.
3. Pari, M. Advanced silo grain-cooling tech for harvest freshness [Electronic resource] / M. Pari. – Mumbai Editorial Marketing Advertising & Coordination Subscriptions Customer Services Technical Support Friday, 2012. – Available at: <http://www.fbnnews.com/article/detnews.asp?articleid=32873§ionid=1>
4. Петруня, Б. Н. Метод хранения зерна с использованием искусственно охлажденного воздуха [Текст] / Б. Н. Петруня, А. И. Пташук // Комбикорма. – 2006. – № 4. – С. 71–74.
5. Величко, Т. Низькі позитивні температури (5...15 °С) дають змогу значно подовжити тривалість зберігання насіння льону (стаття) [Текст] // Т. Величко, Г. Євдокимова, Л. Овсянникова, С. Буйвол // Зерно і хліб. – 2009. – № 1. – С. 40–41.
6. Новицька, Н. Якість насіння польових культур залежно від температурного режиму зберігання [Електронний ресурс] / Н. Новицька, Ю. Степаненко // Е-конференція Тернопільської державної сільськогосподарської дослідної станції ІКСГП НААН України. Секція 1. Сільськогосподарські науки. – Режим доступу: http://econf.at.ua/publ/konferencija_2014_10_16_17/sekcija_1_silskogospodarski_nauki/jakist_nasinnja_polovikh_kultur_zalezno_vid_temperaturnogo_rezhimu_zberigannja/4-1-0-16
7. Каленська, С. М. Управління процесами формування високоякісного насіння сільськогосподарських культур [Текст] / С. М. Каленська, Н. В. Новицька, А. Є. Стихар, О. В. Малеончук // Науковий вісник НАУ. – 2008. – Вип. 123. – С. 13–21.
8. Новицкая, Н. В. Качество семян – залог успеха [Электронный ресурс]: матер. междунауч.-практ. интернет-конф. / Н. В. Новицкая // «Современные направления теоретических и прикладных исследований, 2009», 2009. – Режим доступа: <http://www.sworld.com.ua/>
9. Установки для охлаждения зерна GRANIFRIGOR™. Режим доступа: <http://www.frigortec.com/ustanovki-dlya-ohlazhdeniya-zerna-granifrigor>
10. Морозюк, Л. И. Теплоиспользующие холодильные машины – пути развития и совершенствования [Текст] / Л. И. Морозюк // Холодильна техніка та технологія. – 2014. – № 5. – С. 23-29. doi: 10.15673/0453-8307.5/2014.28695
11. Бараненко, А. В. Состояние и перспективы развития холодильной отрасли в России [Текст] / А. В. Бараненко, Г. А. Белозеров, О. М. Таганцев, В. И. Смыслов, В. Н. Бондарев // Холодильная техника. – 2009. – № 3. – С. 20–24.
12. Железный, В. П. Эколого-энергетические аспекты внедрения альтернативных хладагентов в холодильной технике [Текст] / В. П. Железный, В. В. Жидков. – Донецк: Донбас, 1996. – 144 с.
13. Тітлов, О. С. Розробка охолоджувального комплексу на основі екологічно безпечних робочих тіл [Текст] / О. С. Тітлов, С. М. Петушенко, С. М. Кудашев // Обладнання та технології харчових виробництв. – 2010. – Вип. 24. – С. 200–206.
14. Шилкин, Н. В. Абсорбционные холодильные машины [Электронный ресурс] / Н. В. Шилкин // Режим доступа: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3873
15. Сильман, М. А. Пароводяные эжекторные холодильные машины [Текст] / М. А. Сильман, М. Г. Шумелишский. – Легкая и пищевая пром-сть., 1984. – 271 с.
16. Чумаков, И. Г. Холодильные установки. Проектирование [Текст] / И. Г. Чумаков, Д. Г. Никульшина. – К.: Вища шк., 1988. – 280 с.
17. Петушенко, С. Н. Результаты экспериментальных исследований процессов теплообмена при первичной холодильной обработке зерна мелкосеменных культур [Текст] / С. Н. Петушенко // Холодильна техніка та технологія. – 2013. – № 3. – С. 64–68.
18. Горбис, З. Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков; 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / З. Р. Горбис. – М.: Энергия, 1970. – 424 с.
19. Календерьян, В. А. Тепломассоперенос в аппаратах с плотным дисперсным слоем [Текст] / В. А. Календерьян, И. Л. Бошкова. – К.: Слово, 2011. – 184 с.
20. Бошкова, И. Л. Аналитические модели расчета температуры в материале при действии внутренних источников теплоты [Текст]: зб. наук. пр. / И. Л. Бошкова, Е. В. Георгиев // Актуальні проблеми енергетики та екології. – 2014. – Т. 1., Вип. 45. – С. 33-38.
21. Радчук, С. Дослідження аеродинамічних властивостей насіння ріпаку [Електронний ресурс] / С. Радчук // Е-конференція Тернопільської державної сільськогосподарської дослідної станції ІКСГП НААН України. Секція 4. Технічні науки. – Режим доступу: http://econf.at.ua/publ/konferencija_2014_10_16_17/sekcija_4_tekhnichni_nauki/doslidzhennja_aerodinamichnikh_vlastivostej_nasinnja_ripaku/7-1-0-53
22. Тітлов, О. С. Розробка охолоджувального комплексу на основі екологічно безпечних робочих тіл [Текст] / О. С. Тітлов, С. М. Петушенко, С. М. Кудашев // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – 2011. – Вип. 7. – С. 26–31.