

## Результаты экспериментального исследования тепломассообменных процессов при использовании естественного холода

*А.П. Козловцев, к.т.н., ФГБОУ ВО Оренбургский ГАУ*

Программы экспериментальных исследований тепломассообменных процессов в системе «атмосфера – инженерное сооружение – водная среда» при использовании естественного холода в сельском хозяйстве по оценке интенсивности намораживания ледяной массы и по выбору охладителей молока включали производственные и лабораторные эксперименты.

**Материал и методы исследования.** Лабораторный эксперимент состоял из нескольких циклов опытов, проведённых на базе молочнотоварных ферм в хозяйствах Оренбургской области, в лаборатории машинного доения Оренбургского ГАУ.

Первый цикл опытов был направлен на исследование температурных режимов работы термосифонов с использованием тепловизора. Затем изучали теплообменные процессы в простейших фляжных охладителях (второй цикл). Определяли влияние температуры окружающего конденсатора воздуха и скорости воздушного потока на суточную холодопроизводительность термосифона (третий цикл), определяли интенсивность увеличения поверхностного слоя льда в бассейне и скорость подплавления льда в льдоаккумуляторе в процессе эксплуатации (четвёртый цикл).

По результатам проведённых теоретических исследований были определены основные параметры, влияющие на холодопроизводительность термосифона, влияния температуры и скорости ветра на скорость намораживания поверхностного слоя при послойном намораживании. Задачами исследования предусматривалось определить динамику намораживания льда в льдохранилище (холодопроизводительность) и конструктивно-технические параметры льдохранилища.

Некоторые величины, которые определяли аналитически, были получены с оговоренными допущениями, так как их точное определение затруднительно ввиду малой изученности процесса наморозки льда на поверхности и вокруг термосифона [1–3].

Для теоретических исследований потребовались данные о влиянии температуры окружающего воздуха и скорости воздушного потока на процесс промерзания воды. Для этого за основу взята методика определения радиуса промерзания грунта вокруг термосифона и на поверхности воды [3].

На заключительном этапе проводили производственные эксперименты, целью которых было подтверждение и уточнение результатов теоретических исследований и данных, полученных в ходе лабораторных исследований термосифона

для замораживания воды и послойного намораживания [3–5].

Экспериментальное исследование предусматривало применение нескольких методик: тепловизионного исследования температурных режимов работы термосифона; определения расчёта теплообменных процессов во фляжном охладителе; определения влияния температуры воздуха вокруг конденсатора термосифона на холодопроизводительность; определения влияния скорости воздушного потока на холодопроизводительность термосифона; определения распределения температур в толще льда, интенсивности его роста и толщины.

**Результаты исследования.** В результате первого цикла экспериментов была выявлена перспективность тепловизионного способа. В процессе эксперимента разработана методика его проведения термографом при работе с термосифонами (особый температурный режим, настройка прибора) и установлены особенности работы.

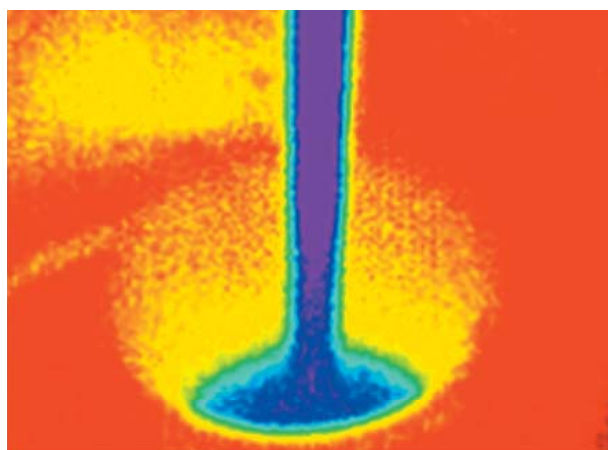


Рис. 1 – Термограмма процесса намораживания льда

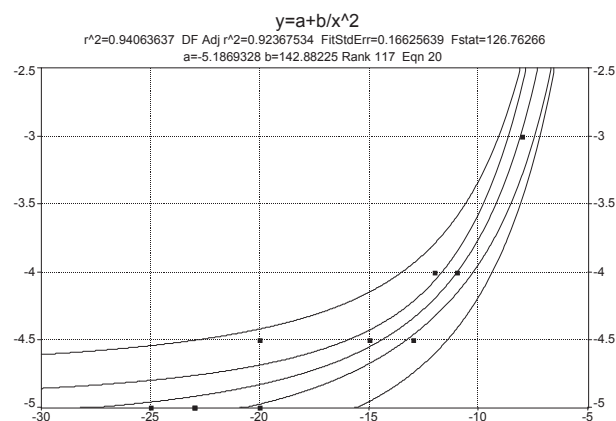


Рис. 2 – Зависимость изменения температуры испарительной части термосифона, находящегося в лаборатории с положительными температурами, от температуры конденсатора

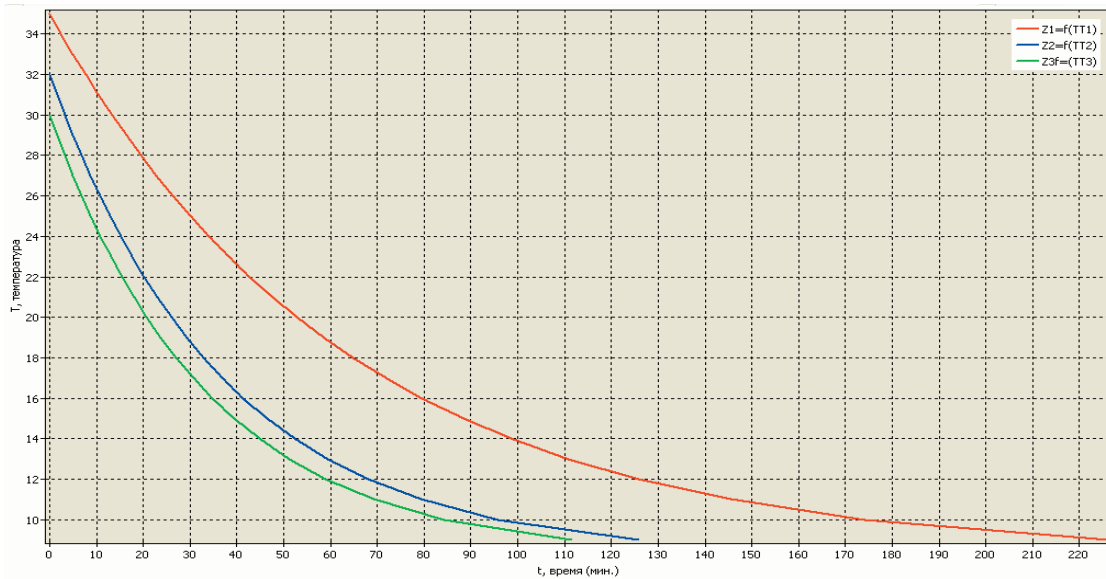


Рис. 3 – Зависимость длительности охлаждения каждого из трёх продуктов до данной температуры

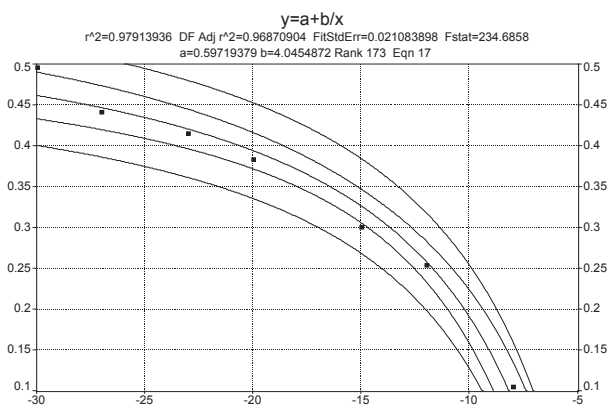


Рис. 4 – Графическое представление  $Q=f(t_a)$

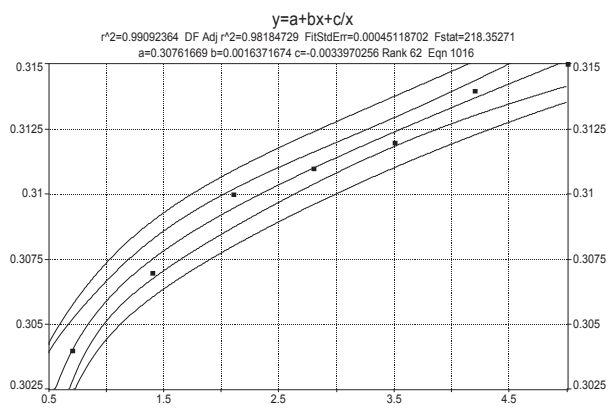


Рис. 5 – Графическое представление  $Q=f(v_a)$

Тепловизионная карта представлена на рисунке 1. Термограмма показывает достаточно равномерное распределение температуры по испарительной части. По результатам опытных значений параметров построены графические зависимости изменения температуры испарительной части термосифона, находящегося в лаборатории с положительными температурами, от температуры конденсатора, напрямую связанной с температурой окружающей среды (рис. 2).

Графическое представление показывает, что зависимость между истинной величиной отклика и факторами носит нелинейный характер. Поэтому возможно использование нелинейной регрессионной модели второго порядка. Уравнение, описывающее графическое представление зависимости отклика от факторов на рисунке 2, имеет вид:

$$Y_i = a + b/x^2, \quad (1)$$

где  $a, b$  – свободный член и коэффициент уравнения регрессии;

$X_i$  – факторы.

Уравнение линейной регрессии, описывающее взаимосвязь холодопроизводительности термо-

сифона и температуры окружающего воздуха, имеет вид:

$$Y = -5,1869328 + 142,88225/X^2, \quad (2)$$

где  $Y$  – температура испарительной части термосифона, °С;

$X$  – температура конденсатора термосифона, °С.

Второй цикл экспериментов показал, что температура охлаждаемых продуктов во фляжном охладителе снижается по экспоненте с различными показателями степени, стремясь либо к значению равновесной температуры либо к температуре среды с постоянным значением температуры. В то же время температура ограниченной охлаждающей среды (хладоноситель) повышается по экспоненте, также приближается к значению равновесной температуры.

Все рассмотренные методики охлаждения жидкотекучих продуктов основаны на теплопередаче от охлаждаемого продукта к хладоносителю за счёт теплопроводности.

Наглядное представление характера изменения температуры охлаждаемого продукта и хладоносителя даёт графическое изображение процесса (рис. 3).

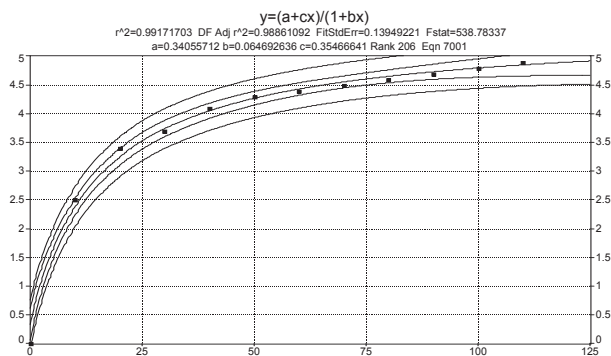


Рис. 6 – Зависимость толщины льда от времени:

----- экспериментальные данные;  
 ————— расчётные данные

В третьем цикле испытаний в процессе практических исследований выявили показатель, определяющий влияние температуры окружающего воздуха и скорости ветрового потока на холодопроизводительность термосифона.

Замеры температуры воздуха вокруг конденсатора термосифона, температуры воздуха в помещении, температуры воды в льдохранилище и толщины ледяного слоя проводились не реже одного раза в сутки. В качестве оборудования для определения холодопроизводительности термосифона нами был смонтирован опытный образец устройства.

По результатам опытных значений параметров построены графические зависимости изменения холодопроизводительности термосифона  $Q$  от изменения температур  $t_a$  (рис. 4).

Графическое представление показывает, что зависимость между истинной величиной отклика и фактором является линейной, поэтому воспользуемся линейной регрессионной моделью первого порядка, имеющей вид:

$$Y_i = a + b/x, \quad (3)$$

где  $b$ ,  $b$  – свободный член и коэффициент уравнения регрессии;

$X$  – факторы.

Уравнение линейной регрессии, описывающее взаимосвязь холодопроизводительности термосифона и температуры окружающего воздуха, имеет вид:

$$Y = 0,59719379 + 4,0454872/X, \quad (4)$$

где  $Y$  – холодопроизводительность термосифона, кВт;

$X$  – температура окружающего воздуха, °С.

Результаты изучения влияния температуры воздуха вокруг конденсатора позволили выявить, что средняя холодопроизводительность термосифона за исследуемый период составит 0,344 кВт, что соответствует 29684,571 кДж/сут, средний суточный прирост массы льда при этом составит 88,876 кг.

Значимым моментом в процессе образования льда является наряду с температурой скорость воздушного потока. В процессе исследования на

конденсатор термосифона направляли воздушный поток, создаваемый вентилятором. Для повышения точности проводимого эксперимента воздушный поток необходимо было направить по раструбу. Скорость воздушного потока изменялась с помощью частотного преобразователя от 0,7 до 5 м/с и измерялась цифровым анемометром GM-8901. Температура воздуха вокруг конденсатора при этом не изменялась (-15°С).

Снятие параметров работы термосифона проводили при каждом установившемся режиме (скорость, температура) не ранее чем через 30 мин. с момента начала эксперимента. По окончании эксперимента вентилятор отключали и полученные экспериментальные данные заносили в таблицу. По результатам опытных значений параметров построены графические зависимости изменения холодопроизводительности термосифона  $Q$  от изменения скорости воздушного потока (рис. 5).

По графику видно, что зависимость между истинной величиной отклика и фактором является линейной, поэтому воспользуемся линейной регрессионной моделью первого порядка, имеющей вид:

$$Y_i = a + bx + c/x, \quad (5)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – свободный члены и коэффициент уравнения регрессии;

$X_i$  – факторы.

Уравнение линейной регрессии, описывающее взаимосвязь холодопроизводительности термосифона и скорости воздушного потока, примет вид:

$$Y = 0,30761669 + 0,0016371674x + 0,0033970256/x, \quad (6)$$

где  $Y$  – холодопроизводительность термосифона, кВт;

$X$  – температура окружающего воздуха, °С.

При проведении экспериментального исследования было выяснено: увеличение скорости воздушного потока, направляемого на конденсатор термосифона, приводит к повышению холодопроизводительности термосифона. Основным показателем качественной работы устройств аккумуляции холода является условие послойного намораживания льда в льдоаккумуляторах в зимний период. Важный параметр, необходимый для функционирования льдоаккумуляторов, это рассчитанный объём льда для круглогодичного охлаждения молока, который зависит от интенсивности его намораживания. В связи с этим разработана методика определения распределения температур в толще льда, интенсивности его роста и толщины.

При проведении предварительных испытаний было выявлено, что распределение температуры в толще льда и толщина исследуемого слоя в начальный период существенно изменяются в течение короткого времени. Температура воды в бассейне практически не изменяется. В связи с этим в первую очередь записывали параметры

распределение температуры в толще льда и толщина исследуемого слоя и затем регистрировали изменение температуры воды.

По результатам данных, полученных в ходе проведения эксперимента и изучения расчётных параметров, построены графики зависимости толщины льда от времени (рис. 6).

Уравнение регрессии, описывающее взаимосвязь толщины льда и времени намораживания, имело вид:

$$Y = (0,34055712 + 0,35466641x) / (1 + 0,064692636x).$$

При проведении производственных испытаний были окончательно установлены значения эксплуатационных параметров, влияющих на холодопроизводительность устройств [6]. Исследование проводили в хозяйствах ООО «Ключевское» Пономарёвского района, ООО «Пилюгинский АПК» Бугурусланского района и ООО «А7 ОГРО» ОП «Благодарное» Ташлинского района.

**Выводы.** В процессе исследования эффективность работы льдоаккумуляторов с термосифонами

и льдоаккумуляторов послыйного намораживания продолжительность охлаждения молока сравнивали с эффективностью работы холодильных машин, использующихся в хозяйствах. Результаты исследования тепломассообменных процессов при функционировании предложенных систем охлаждения позволили сделать заключение о стабильности протекающих процессов и возможности использования льдогенераторов в условиях пищевых перерабатывающих предприятиях.

### Литература

1. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. школа, 2000. 479 с.
2. Морозов Н.М. Программа и методика проведения исследований по разработке систем машин для комплексной механизации животноводства. М.: ИК «Родник», 1999. 228 с.
3. Козловцев А.П., Квашенников В.И., Шахов В.А. Охлаждение молока на молочных фермах: монография. Оренбург: Издательский центр ОГАУ, 2016. 190 с.
4. Мельников С.В., Алешкин В.Р., Рошин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 1972. 200 с.
5. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в науке и технике. М.: Мир, 1980. 610 с.
6. Коровин Г.С. Разработка и обоснование водооборотного льдоаккумулятора для молочнотоварных ферм: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Оренбург, 2015. 19 с.