

DOI: 10.5281/zenodo.3945208

УДК: 621.56

РАСЧЕТ ТОЛЩИНЫ НАМОРАЖИВАНИЯ ЛЬДА В ЛЬДОХРАНИЛИЩАХ СИСТЕМ ЕСТЕСТВЕННОГО ХОЛОДА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ МОЛОКА И ХРАНЕНИЯ ПЛОДОВООВОЩНОЙ ПРОДУКЦИИ

*Алла КИРСАНОВА, Августин ВОЛКОНОВИЧ, Викторин СЛИПЕНКИ,
Онорин ВОЛКОНОВИЧ, Ина ВОЛКОНОВИЧ*

Abstract. This article presents the results of a study on finding factors that affect the thickness of ice freezing in ice storage facilities in natural cold plants designed for cooling milk and storing fruits and vegetables. The article presents the results of using the least squares method with preliminary orthogonalization of factors and the parabolic smoothing method with unequal values of the argument to establish the law to which the thickness of ice freezing in ice storage facilities obeys. The article proves that the thickness of ice freezing depends mainly on the number of days with a negative average daily temperature, and also proves the adequacy of the obtained mathematical model.

Key words: Ice storage; Ice freezing; Thickness; Least squares method; Orthogonalization; Parabolic smoothing method.

Реферат. В настоящей статье изложены результаты исследования по оценке факторов, влияющих на толщину намораживания льда в льдохранилищах в установках естественного холода, предназначенных для охлаждения молока и хранения фруктов и овощей. В данной работе приведены результаты применения метода наименьших квадратов с предварительной ортогонализацией факторов, а также метода параболического сглаживания при неравноотстоящих значениях аргумента для установления закона, которому подчиняется толщина намораживания льда в льдохранилищах. В статье авторы доказывают, что толщина намораживания льда зависит в основном от количества суток с отрицательной среднесуточной температурой, а также приводят доказательство адекватности полученной математической модели.

Ключевые слова: Льдохранилища; Намораживание льда; Толщина; Метод наименьших квадратов; Ортогонализация; Метод параболического сглаживания.

ВВЕДЕНИЕ

Усовершенствование энергосберегающих систем, применяемых для охлаждения и хранения сельскохозяйственной продукции (фруктов, овощей, молока) остается в настоящее время одной из актуальных проблем сельского хозяйства. Среди эффективных систем охлаждения сельхозпродукции особое место занимают системы естественного холода. Такие системы позволяют экономить энергетические и другие материальные ресурсы. Кроме того, естественный холод является одним из важнейших возобновляемых экологически чистых источников энергии. Системы естественного холода позволяют охлаждать сельскохозяйственную продукцию непосредственно на месте её производства. Основной идеей использования таких систем является аккумулирование природного холода воды и льда при помощи аккумуляторов холода. Среди преимуществ систем естественного холода можно отметить относительную простоту изготовления и обслуживания, высокую надежность, экономичность с точки зрения потребления электроэнергии, исключение использования фреона, низкая себестоимость холода.

Использование льда в качестве высокотеплоемкого хладоносителя со стабильной температурой и изменяющимся агрегатным состоянием наиболее экономично в случае неравномерности потребления холода при околонулевых температурах. Например, ледяные холодо-аккумуляторы могут обеспечивать суточную и сезонную равномерность нагрузки холодильных машин (Бобков, В.А. 1977).

В решение проблемы эффективного использования систем естественного холода наибольший вклад внесли ученые В.А. Бобков (1977), И.Н. Босин (1997), Л.Ф. Волконович (2002), Б.П. Коршунов (2014), А. М. Мусин, Ф.Г. Марьяхин, А.И. Учеваткин (1991), В.М. Руских (2010), Ю.А. Цой (1988) и другие.

Данные ученые комплексно рассмотрели научно-технические основы холодильной льдотехники, сформировали основные требования к системам охлаждения молока, разработали физические, технологические и экономические стороны проблемы, сформулировали теоретические

положения и установили математические зависимости, определяющие методы расчетов и рационального применения холодильной льдотехники в сельском хозяйстве.

В рамках настоящего исследования нами предпринята попытка применения и адаптации разработанных методов и методик на территории Приднестровья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Задачи исследования решаются с помощью методик исследования энергосберегающих систем хранения фруктов и овощей с применением естественного и искусственного холода (Бобков, В.А. 1977; Волконович, Л. et al. 2002; Мусин, А.М. et al. 1991; Цой, Ю.А. 1988), результатов исследования особенностей климатических условий Приднестровья (Кирсанова, А, Волконович, Л. 2019). Так же применяются методики обработки исходных данных на основе существующих методик и методов теории вероятностей, математической статистики и математического моделирования (Долгов, Ю. 2011).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Территориально Приднестровье находится в центре Республики Молдова и как доказано нами ранее (Кирсанова, А, Волконович, Л. 2019), Приднестровье можно разделить на две агроклиматические зоны, что необходимо учитывать при выполнении расчетов, в которых используются метеорологические данные (например, среднесуточная температура, скорость ветра).

В частности нами исследована возможность заготовки льда на территории Приднестровья в льдохранилищах путем намораживания при подаче воды слоями по 0,5 см. Согласно Бобкову В.А. (1977), за сутки можно наморозить слой льда толщиной (в см):

$$h = -\frac{t}{3} \cdot \left(1 + \frac{v}{2}\right) \quad (1)$$

где t – температура, $^{\circ}\text{C}$, v – скорость ветра, м/с.

Развитие данного вопроса для территорий с частыми оттепелями освещено в работах Л.Ф. Волконовича, К. Сырги (2002), в которых было уточнено, что в таких регионах, расчет толщины слоя намороженного льда следует производить по формуле:

$$h = -\frac{Q}{3} \cdot \left(1 + \frac{v}{2}\right), \quad (2)$$

где Q – запас холода, определяемый по формуле:

$$Q = \sum_{i=1}^{T_x} t_i, \quad (3)$$

где T_x – количество суток с отрицательной среднесуточной температурой.

Произведены расчеты для сезонного хранения фруктов и овощей, когда среднесуточная температура воздуха не превышает $+14^{\circ}\text{C}$ (предельная температура хранения фруктов и овощей) в течение 2014-2019 гг. для четырех городов Приднестровья. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Согласно формуле (2), имеются только два параметра, от которых зависит толщина намораживания льда – это среднесуточные значения температуры и скорости ветра. Однако в результате сравнительного анализа данных, приведенных в таблице 1, можно заметить, что, например:

1) по г. Дубоссары в исследуемый период 2014-2015 гг. запас холода составил $Q = -138,5^{\circ}\text{C}$, толщина намораживания льда $h = 96,18$ см, а в период 2015-2016 гг. запас холода больше - $Q = -145,0^{\circ}\text{C}$, а $h = 92,99$ см, т. е. меньше;

2) по г. Тирасполь в исследуемый период 2014-2015 гг. запас холода составил $Q = -156,0^{\circ}\text{C}$, т. е. меньше, чем по г. Рыбница в период 2014-2015 гг. $Q = -182,8^{\circ}\text{C}$, однако толщина намораживания льда в г. Тирасполь $h = 128,19$ см, что больше, чем в г. Рыбница - $h = 120,49$ см;

3) по г. Тирасполь в исследуемый период 2016-2017 гг. запас холода составил $Q = -258,2^{\circ}\text{C}$ меньше, чем по г. Рыбница в период 2016-2017 гг., где $Q = -304,2^{\circ}\text{C}$. Однако толщина

намораживания льда в Тирасполе $h = 219,39$ см, что больше, чем в Рыбнице $h = 202,60$ см. То есть в Рыбнице при запасе холода на 18 % большем, чем в Тирасполе, получена на 8% меньшая толщина намораживания льда;

Таблица 1. Толщина намораживания льда в льдохранилищах

Параметр	Город	Период				
		2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019
v_{cp} , м/с в T_x дней	Каменка	2,41	2,63	2,26	2,07	2,29
	Рыбница	1,88	1,92	1,88	2,00	2,04
	Дубоссары	2,00	1,91	2,11	1,83	1,74
	Тирасполь	2,93	2,86	2,84	2,73	2,59
t_{cp} , °С в T_x дней	Каменка	-3,86	-5,09	-4,35	-4,30	-3,43
	Рыбница	-3,81	-5,21	-4,35	-4,22	-3,64
	Дубоссары	-3,38	-5,00	-4,08	-4,41	-3,22
	Тирасполь	-3,90	-5,49	-4,03	-4,24	-3,22
запас холода Q , °С	Каменка	-192,8	-172,9	-321,6	-257,8	-236,3
	Рыбница	-182,8	-177,0	-304,2	-248,9	-222,0
	Дубоссары	-138,5	-145,0	-236,5	-189,7	-164,1
	Тирасполь	-156,0	-170,2	-258,2	-195,0	-173,8
количество дней T_x	Каменка	50	34	74	60	69
	Рыбница	48	34	70	59	61
	Дубоссары	41	29	58	43	51
	Тирасполь	40	31	64	46	54
h , см	Каменка	144,19	130,64	233,10	178,96	167,94
	Рыбница	120,49	115,23	202,60	164,26	148,29
	Дубоссары	96,18	92,99	169,70	135,26	101,25
	Тирасполь	128,19	133,17	219,39	166,13	132,73

4) по г. Тирасполь в исследуемый период 2016-2017 запас холода $Q = -258,2$ °С практически такой же, как по г. Каменка в период 2017-2018, где $Q = -257,8$ °С. При округлении до целых запас холода одинаков. Однако толщина намораживания льда в Тирасполе $h = 219,39$ см, что больше, чем в Каменке, где $h = 178,96$ см. То есть в Тирасполе при одинаковом с Каменкой запасе холода, получено значительно отличающееся (на 22,6%) расчетное значение толщины намораживания льда;

5) по г. Тирасполь в исследуемый период 2017-2018 гг. запас холода составил $Q = -195,0$ °С меньше, чем по г. Рыбница в период 2017-2018 гг., где $Q = -248,9$ °С. Однако толщина намораживания льда в Тирасполе $h = 166,13$ см, что почти совпадает со значением, полученном для Рыбницы $h = 164,26$ см. То есть в Рыбнице при запасе холода на 27,6 % большем, чем в Тирасполе, получена одинаковая толщина намораживания льда.

Все эти наблюдения привели к практически очевидному выводу: необходимо искать другие факторы, неучтенные исследователями до настоящего времени, влияющие на толщину намораживания льда. Для отыскания ответа на этот вопрос, было принято решение использовать метод наименьших квадратов с предварительной ортогонализацией факторов (Долгов, Ю. 2011)..

Предварительно был составлен план метода наименьших квадратов с предварительной ортогонализацией факторов (МНКО) и построена таблица, в которой приняты следующие обозначения: Z_1 – количество суток с отрицательной среднесуточной температурой; Z_2 – среднее арифметическое значение скорости ветра в указанные сутки; Z_3 – среднее арифметическое значение температуры в указанные сутки; Z_4 – запас холода.

Исследуемые периоды (табл. 1) были пронумерованы с 1 до 5 для г. Каменка, с 6 по 10 для г. Рыбница, с 11 по 15 для г. Дубоссары и с 16 по 20 для г. Тирасполь. Данные по толщине намораживания льда были округлены до десятых долей сантиметра (из соображений здравого смысла). Таким образом, составлена таблица 2.

Таблица 2. План МНК

j	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
1	50	2,412	-3,856	-192,8
2	34	2,629	-5,085	-172,9
3	74	2,255	-4,346	-321,6
4	60	2,068	-4,297	-257,8
5	69	2,287	-3,425	-236,3
6	48	1,875	-3,808	-182,8
7	34	1,921	-5,206	-177,0
8	70	1,876	-4,346	-304,2
9	59	2,003	-4,219	-248,9
10	61	2,039	-3,639	-222,0
11	41	2,000	-3,378	-138,5
12	29	1,910	-5,000	-145,0
13	58	2,114	-4,078	-236,5
14	43	1,826	-4,412	-189,7
15	51	1,739	-3,218	-164,1
16	40	2,930	-3,900	-156,0
17	31	2,855	-5,490	-170,2
18	64	2,844	-4,034	-258,2
19	46	2,730	-4,239	-195,0
20	54	2,593	-3,219	-173,8
\bar{Z}	50,8	2,2453	-4,15975	-207,165

Неизвестную связь между выходной величиной \hat{Y} – толщиной намораживания льда и факторами, влияющими на нее

$$\hat{Y} = f(X_1, X_2, X_3, X_4) \quad i = 1 \div n \quad (4)$$

будем искать в виде полинома, включающего эффекты факторов и их взаимодействия,

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n b_j X_i X_j + \dots + \sum_{i=1}^n b_{i_i} X_i^2 + \dots = \sum_{k=0}^m b_k Z_k, \quad (5)$$

где n – количество рассматриваемых факторов;

m – количество, рассматриваемых эффектов взаимодействий факторов.

С учетом предварительной ортогонализации исходный полином (5) может быть представлен в следующем виде

$$Y = A_0 \psi_0(Z) + A_1 \psi_1(Z) + \dots + A_m \psi_m(Z) = \sum_{k=0}^m A_k \psi_k(Z) \quad (6)$$

где $m+1$ – число членов уравнения регрессии. Степень полинома $\psi_k(Z)$ совпадает с номером столбца k рассматриваемых эффектов Z_k в матрице исходных данных. Поэтому именно на полиномы $\psi_k(Z)$ накладывается условие ортогонализации:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^N \psi_{kj}(Z) \psi_{ij}(Z) = 0; \quad k, i = 0 \div m; \quad k > i; \\ \sum_{j=1}^N [\psi_{kj}(Z)]^2 \neq 0. \end{cases} \quad (7)$$

Решением системы (7) является итеративная процедура:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{kj}(Z) \equiv 1; \\ \psi_{kj}(Z) = Z_{kj} - \sum_{i=0}^{k-1} \xi_{kj} \psi_{ij}(Z); k = 1 \div m; k > i; \\ \sum_{j=1}^N [\psi_{kj}(Z)]^2 \neq 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

где коэффициент влияния

$$\xi_j = \frac{\sum_{k=1}^N Z_k \cdot \psi_j(Z)}{\sum_{j=1}^N [\psi_j(Z)]^2}; k, i = 0 \div m; k > i; \quad (9)$$

Результат расчета ортогональных полиномов $\psi(Z)$ представлен в таблице 3.

Таблица 3. Ортогональные полиномы $\psi(Z)$

j	$\Psi_0(Z)$	$\Psi_1(Z)$	$\Psi_2(Z)$	$\Psi_3(Z)$	$\Psi_4(Z)$	Y	\hat{Y}	$(Y - \hat{Y})^2$
1	1	-0,8	0,1664	-1,5348	46,4240	144,2	157,068	23,4256
2	1	-16,8	0,3237	-0,3342	-12,7566	130,6	317,628	340,0336
3	1	23,2	0,0989	-0,6270	23,2702	233,1	-83,772	7066,084
4	1	9,2	-0,1403	-0,2969	-14,0886	179,0	56,718	897,6016
5	1	18,2	0,1123	0,4194	22,2772	167,9	-33,597	355,6996
6	1	-2,8	-0,3780	0,4248	4,2293	120,5	177,138	814,5316
7	1	-16,8	-0,3843	-0,6334	-12,8820	115,2	317,628	1145,146
8	1	19,2	-0,2950	-0,6286	-20,5731	202,6	-43,632	2868,674
9	1	8,2	-0,2090	-0,2118	-10,6507	164,3	66,753	232,8676
10	1	10,2	-0,1656	0,5498	-24,4728	148,3	46,683	0,5476
11	1	-9,8	-0,2792	1,0504	11,8164	96,2	247,383	2792,066
12	1	-21,8	-0,4139	-0,3130	-4,6750	93,0	367,803	3140,482
13	1	7,2	-0,1017	-0,0194	-5,4319	169,7	76,788	426,8356
14	1	-7,8	-0,4457	-0,0743	-8,4093	135,3	227,313	188,7876
15	1	0,2	-0,5029	0,9102	21,6193	101,3	147,033	2279,108
16	1	-10,8	0,6471	0,7860	0,3671	128,2	257,418	434,3056
17	1	-19,8	0,5385	-0,6119	13,0199	133,2	347,733	250,9056
18	1	13,2	0,6506	0,0678	-6,3519	219,4	16,578	4950,53
19	1	-4,8	0,4695	0,2560	-7,6534	166,1	197,208	291,0436
20	1	3,2	0,3083	1,0404	22,0266	132,7	116,928	266,9956
$\sum(\cdot)^2$		3467,2	2,7820	8,6290	6356,460	149,040		

В таблице 4 приведены рассчитанные значения коэффициентов влияния ξ_{kj} .

Таблица 4. Коэффициенты влияния

k	j			
	0	1	2	3
1	50,8			
2	2,2426	-0,00373		
3	-4,25975	0,02438	-0,2518	

4	-207,165	-3,3133	-3,7705	22,2063
---	----------	---------	---------	---------

Вычисление оценок коэффициентов b_k уравнения (5) сводится к предварительному нахождению коэффициентов A_k при ортогональных полиномах в (6), исходя из условий минимизации остаточной суммы квадратов

$$S = \sum_{j=1}^N \left[Y_j - \sum_{k=0}^m A_k \psi_k(Z) \right]^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

Дифференцируя (10) по каждому коэффициенту A_k и приравнявая результат к нулю, получим систему $(m+1)$ линейных уравнений, решением которой будет выражение для расчета коэффициентов модели A_k в ортогональном пространстве

$$\hat{A}_k = \frac{\sum_{j=1}^N Y_j \cdot \psi_j(Z)}{\sum_{j=1}^N [\psi_j(Z)]^2}; k = 0 \div m. \quad (11)$$

Из (11) видно, что коэффициенты A_k определяются независимо друг от друга, так как рассматриваются на основе полиномов различных порядков. Следовательно вопрос включения в уравнение (6) каждого коэффициента A_k может решаться отдельно по критерию Стьюдента. Для этого предварительно рассчитывается среднеквадратическое отклонение (СКО) очередного коэффициента A_k

$$S\{\hat{A}_k\} = \sqrt{\frac{S^2(Y)}{\sum_{j=1}^N [\psi_j(Z)]^2}} \quad (12)$$

где $S^2\{Y\}$ – средняя (или взвешенная) дисперсия выходной величины по неповторяющимся строкам плана. Однако допускается для оценки средней дисперсии взять эмпирическую дисперсию распределения выходной величины, деленную на 4 (минимальное число равнодействующих составляющих, которые может дать нормальное распределение).

Величина $S\{\hat{A}_k\}$ подставляется в выражения для расчета критерия Стьюдента

$$t_k = \frac{|A_k|}{S\{\hat{A}_k\}} \geq t_{\text{табл}}(q, v) \quad (13)$$

Данный критерий сравнивается с табличным при уровне значимости q и $v = N-1$ числе степеней свободы. Если условие (13) выполняется, то коэффициент A_k признается значимым и включается в уравнение (6), иначе – не включается.

Результаты расчета коэффициентов модели A_k в ортогональном пространстве, СКО и критерия Стьюдента каждого коэффициента сведены в таблицу 5.

Таблица 5. Результаты расчетов

k	A_k	S_k	t_k	Вывод о значимости коэффициента
0	149,040	21,935	8,873	значимый
1	-10,035	1,666	6,023	значимый
2	34,405	58,813	<1	незначимый
3	-15,150	33,395	<1	незначимый
4	0,632	1,230	<1	незначимый

Дисперсия $S^2\{Y\} = 1438,2834$, $S_p^2 = 359,5709$.

Значение средневзвешенной дисперсии $S_p^2 = S^2\{Y\}/4$ найдено по теореме Ляпунова о трех случайных числах.

Таким образом, полученная модель имеет вид $\hat{Y} = 149,04 - 10,035 \cdot \psi_1(Z)$. Следовательно, можно сделать вывод о том, что величина толщины намораживания льда h зависит только от количества суток с отрицательной среднесуточной температурой. Построим точечный график зависимости толщины намораживания льда от количества суток с отрицательной среднесуточной температурой.

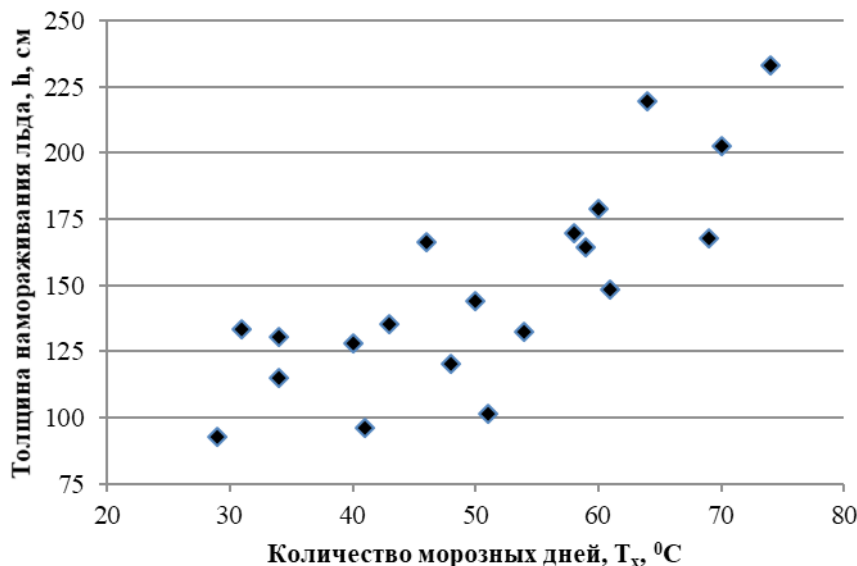


Рисунок 1. График зависимости толщины намораживания льда от количества суток с отрицательной среднесуточной температурой

Вычислим кривую $h = f(T_x)$ методом параболического сглаживания при неравноотстоящих значениях аргумента [4]. Уравнение будем искать в виде

$$f(x) = k_0 + k_1 q_1(x) + \dots + k_\lambda q_\lambda(x), \quad (14)$$

где $\lambda \leq n - 1$, где n – объем выборки.

Произведенные расчеты:

1) вычисление параболы нулевого порядка:

$$k_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i = 149,055;$$

$$\Sigma_0 = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2}{n} = 473108,17 - \frac{2981,1^2}{20} = 28760,3095;$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum \lambda}{n - (\lambda + 1)}} = 38,9063; \quad \bar{T}_x = 50,8;$$

$$k_1 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} = 7992,24/3467,20 = +2,3051;$$

$$f(x) = 149,055 + 2,3051 \cdot x.$$

2) вычисление параболы первого порядка:

$$\Sigma_1 = \Sigma_0 - k_1^2 \cdot \sum x_i^2 = 28760,3095 - 2,3051^2 \cdot 3467,20 = 10337,3908;$$

$\sigma_1 = 23,9645$; $\sigma_1 < \sigma_0$, продолжаем вычисления.

$$A_2 = \frac{1}{N} \sum x_i^2 = \frac{1}{20} \cdot 3467,20 = 173,36;$$

$$B_2 = \frac{\sum x_i^3}{\sum x_i^2} = \frac{276,48}{3467,20} = 0,07974;$$

$$C_2 = \sum x_i^4 - B_2 \cdot \sum x_i^3 - A_2 \cdot \sum x_i^2;$$

$$C_2 = 1156969,024 - 0,07974 \cdot 276,48 - 173,36 \cdot 3467,20 = 555873,1855;$$

$$k_2 = \frac{\sum h_j x_j^2 - k_0 \cdot \sum x_j^2 - k_1 \cdot \sum x_j^3}{C_2};$$

$$k_2 = \frac{548907,048 - 149,055 \cdot 3467,20 - 2,3051 \cdot 276,48}{555873,1855} = 0,05660;$$

$$q_2(x) = x^2 - B_2 \cdot x - A_2 = x^2 - 0,07974 \cdot x - 173,36;$$

$$k_2 \cdot q_2(x) = 0,0566 \cdot x^2 - 0,0045 \cdot x - 9,8122;$$

$$f(x) = 0,0566 \cdot x^2 + 2,3006 \cdot x + 139,2428. (\pm 45,0)$$

$$\Sigma_2 = \Sigma_1 - k_2^2 \cdot C_2 = 10337,3908 - 0,0566^2 \cdot 555873,1855 = 8556,6177;$$

$$\sigma_2 = 22,4350; \Delta h = +2 \cdot 22,435 \approx \pm 45,0.$$

Для удобства представим все расчеты в виде таблицы.

Таблица 6. Результаты расчетов кривой $h = f(T_x)$

j	Аргумент T_x	Функция h	$x_i = T_{xi} - \bar{T}_x$	$h_j \cdot x_j$	$h_j \cdot x_j^2$	$f(x)$	x_j^2
1	29	93,0	-21,8	-2027,40	44197,320	116,0	4,5552
2	31	133,2	-19,8	-2637,36	52219,728	115,9	2,5886
3	34	115,3	-16,8	-1937,04	32542,272	116,6	0,0137
4	34	130,6	-16,8	-2194,08	36860,544	116,6	1,6810
5	40	128,2	-10,8	-1384,56	14953,248	121,0	0,4284
6	41	96,2	-9,8	-942,76	9239,048	122,1	5,5071
7	43	135,6	-7,8	-1057,68	8249,904	124,7	0,9458
8	46	166,1	-4,8	-797,28	3826,944	129,5	10,3430
9	48	120,5	-2,8	-337,4	944,720	133,2	1,2191
10	50	144,2	-0,8	-115,36	92,288	137,4	0,3329
11	51	101,3	0,2	20,26	4,052	139,7	10,5568
12	54	132,7	3,2	424,64	1358,848	147,2	1,4248
13	58	169,7	7,2	1221,84	8797,248	158,7	0,7621
14	59	164,3	8,2	1347,26	11047,532	161,9	0,0353
15	60	179,0	9,2	1646,8	15150,560	165,2	1,1534
16	61	148,3	10,2	1512,66	15429,132	168,6	2,4430
17	64	219,4	13,2	2896,08	38228,256	179,5	8,8825
18	69	167,9	18,2	3055,78	55615,196	199,9	5,1094
19	70	202,6	19,2	3889,92	74686,464	204,3	0,0138
20	74	233,1	23,2	5407,92	125463,744	223,1	0,4502
сумма	1016	2981,2	0	7992,24	548907,048	4146,6	58,4461

Произведем обратный переход к первоначальным обозначениям:

$h = 0,0566 \cdot (T_x - 50,8)^2 + 2,3006 \cdot (T_x - 50,8) + 139,2428$, после упрощения получим:

$$h = 0,0566 \cdot T_x^2 - 3,4500 \cdot T_x + 168,4364. \quad (15)$$

Проверка модели на адекватность показала, что критерий Пирсона

$\chi_p^2 = 58,4461 > \chi_{таб}^2(5\%; \nu = 17) = 27,59$. Однако убирая грубые промахи (строки 6, 8, 11 и 17 – значения периодов с аномальной температурой, даны в таблице курсивом) получаем:

$\chi_p^2 = 23,1567 < \chi_{таб}^2$. Таким образом, доказано, что полученная математическая модель адекватна. Без учета грубых промахов коридор ошибок $\Delta h = \pm 30$ см.

Графически сглаживание представлено на рисунке 2.

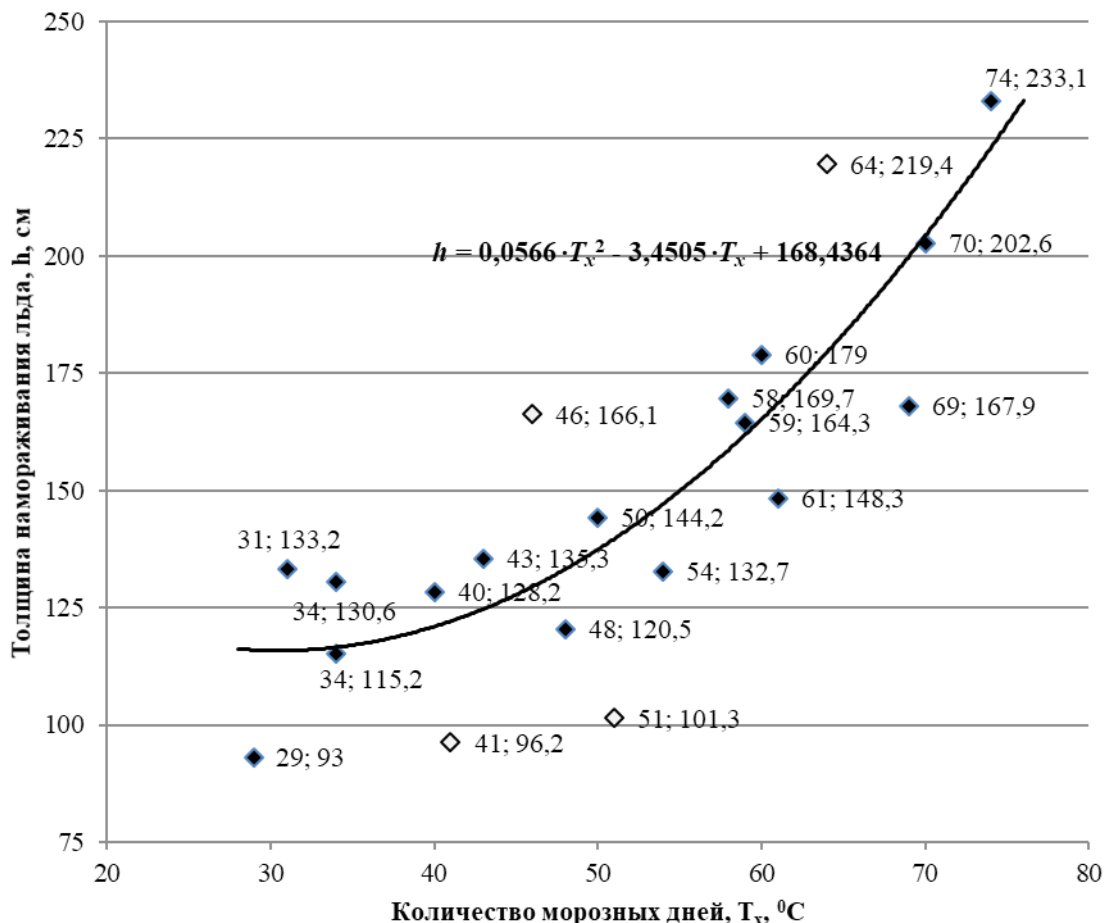


Рисунок 2. Зависимость толщины намораживания льда от количества морозных дней

Грубые промахи изображены незакрашенными точками, наглядно видно, что они удалены от сглаживающей кривой.

Итак, в настоящем исследовании доказано, что толщина намораживания льда подчиняется закону (15) с коридором ошибок $\Delta h = \pm 30$ см.

Следующим этапом исследования будет расчет конструктивных параметров льдохранилища, опираясь на полученные результаты.

ВЫВОДЫ

В рамках настоящей статьи приведены результаты исследования возможности заготовки льда на территории Приднестровья в льдохранилищах путем намораживания при подаче воды слоями по 0,5 см. Расчеты произведены для сезонов хранения фруктов и овощей в течение 2014-2019 гг. для четырех городов Приднестровья. Произведен сравнительный анализ результатов расчетов, произведенных на основе методики Бобкова В.А. и исходных данных, замечено противоречие, что

привело к выводу о необходимости рассмотрения других факторов, неучтенных исследователями до настоящего времени, но влияющих на толщину намораживания льда. Был использован метод наименьших квадратов с предварительной ортогонализацией факторов. Получена модель, на основе которой, сделан вывод о том, что величина толщины намораживания льда в льдохранилищах зависит от количества суток с отрицательной среднесуточной температурой. Был построен график зависимости толщины намораживания льда от количества суток с отрицательной среднесуточной температурой и вычислена кривая $h = f(T_x)$ методом параболического сглаживания при неравноотстоящих значениях аргумента. Произведен обратный переход к первоначальным обозначениям. Доказано, что полученная математическая модель адекватна. Доказано, что толщина намораживания льда подчиняется закону (15) с коридором ошибок $\Delta h = \pm 30$ см.

Следующим этапом исследования будет расчет конструктивных параметров льдохранилища, опираясь на полученные результаты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. БОБКОВ, В.А. (1977). Производство и применение льда. Москва: Пищевая промышленность. 233 с.
2. БОСИН, И.Н. (1997). Аккумулятор естественного холода. В: Сельский механизатор, № 4, с. 32. ISSN 0131-7393.
3. ВОЛКОНОВИЧ, Л., СЫРГИ, К. (2002). Энергосберегающие, экологические системы естественного холода для хранения пищевых продуктов. Кишинёв. 336 с. ISBN 9975-62-078-7.
4. ДОЛГОВ, Ю. (2011). Статистическое моделирование. Тирасполь. 352 с. ISBN 9975-9630-1-3.
5. КИРСАНОВА, А., ВОЛКОНОВИЧ, О. (2019). Анализ температур воздуха для идентификации зон применения установок искусственного и естественного холода для охлаждения молока и хранения фруктов и овощей на территории Приднестровья. In: Știința agricolă, nr. 2, pp. 114-120. ISBN 1857-0003.
6. КОРШУНОВ, А.Б., ИВАНОВ, В.В. (2014). Технологические схемы энергосберегающих систем для охлаждения молока на фермах. В: Инновации в сельском хозяйстве, № 4, с. 233-236.
7. МУСИН, А.М., МАРЬЯХИН, Ф.Г., УЧЕВАТКИН, А.И. и др. (1991). Изготовление и использование установок естественного холода для охлаждения молока: рекомендации. Москва: Росагропромиздат. 28 с.
8. РУССКИХ, В.М. (2010). Способы охлаждения сырого молока. В: Переработка молока, № 7, с. 31-33. ISSN 2222-5455.
9. ЦОЙ, Ю.А. (1988). Механико-технологическое обоснование повышения эффективности механизированных поточных линий доения и первичной обработки молока: Автореф. дис. ... д-ра технич. наук. Москва: ВИМ. 38 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КИРСАНОВА Алла*  <https://orcid.org/0000-0001-6541-5678>

кандидат педагогических наук, Государственный Аграрный Университет Молдовы
E-mail: avki@mail.ru

ВОЛКОНОВИЧ Августин  <https://orcid.org/0000-0002-0346-5423>

докторант, Государственный Аграрный Университет Молдовы
E-mail: augustin.volk@gmail.ru

СЛИПЕНКИ Викторин  <https://orcid.org/0000-0003-2253-5324>

докторант, Государственный Аграрный Университет Молдовы
E-mail: slipenchivictorin@mail.ru

ВОЛКОНОВИЧ Онорин  <https://orcid.org/0000-0003-1623-2028>

докторант, Государственный Аграрный Университет Молдовы
E-mail: onorin.volconovici@gmail.com

ВОЛКОНОВИЧ Ина  <https://orcid.org/0000-0002-4907-7944>

докторант, Государственный Аграрный Университет Молдовы
E-mail: globa.ina95@gmail.com

*Corresponding author: avki@mail.ru

Data prezentării articolului: 30.03.2020

Data acceptării articolului: 07.05.2020