

УДК 641.437.075.8

## ТЕПЛОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАРБУЗІВ, КАБАЧКІВ, КУКУРУДЗИ МОЛОЧНОЇ СПІЛОСТІ І СОЛОДКОГО ПЕРЦЮ ТА ЇХ ПРОГНОЗУВАННЯ

Ялпачик В. Ф., д.т.н.

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

Тел. (0619)42-13-06

**Анотація** – робота присвячена розробці алгоритму розрахунку теплофізичних характеристик сільськогосподарської продукції. Дане співставлення розрахункових та знайдених в літературі експериментальних даних з питомої ефективної теплоємності, похибка не перевищує 8-10% у всьому інтервалі температур.

**Ключові слова** – кристалізація води, фізична густина, втрата маси, ефективна теплопровідність, енерго- та ресурсозбереження, теплофізичні характеристики.

*Постановка проблеми.* Для вирішення задач енерго- та ресурсозбереження при проектуванні технічних систем для тривалого збереження рослинної сировини, необхідно знати теплофізичні характеристики цих продуктів.

*Аналіз останніх досліджень.* В результаті аналізу літературних джерел [1,4], в якості базових об'єктів для охолодження та заморожування вибрані: гарбузи, кабачки, кукурудза молочної спілості і солодкий перець. При цьому були виділені два види кабачків – літні та зимові сорти.

*Основна частина.* Розрахунок теплофізичних характеристик виконано за алгоритмом розробленим на мові Turbo Pascal.

При заданих вхідних даних щодо вологовмісту  $W_{in}$ , температури початку кристалізації води  $T_{кр}$ , масової концентрації атмосферних газів, протеїну, жиру, вуглеводнів, клітковини та золи розраховуємо значення густини, питомої ефективної теплоємності, питомої ентальпії, ефективної теплопровідності (перколяції теплоти), масової частки вимороженої води при кожній заданій температурі плодоовочевого об'єкту в діапазоні від мінус 40 °С до плюс 40 °С. Ці процедури дозволяють проводити розрахунки для всіх досліджуваних плодів та овочів на єдиній інформаційній основі щодо властивостей компонентів. Початковою для розрахунків виступає процедура

**PROCEDURE TPHYS(J:integer;TK:extended;  
Var Cp,RSu,LD:extended),**

в якій  $j$  – вхідне значення номеру речовини, теплофізичні властивості якої мають бути розраховані,  $TK$  – вхідне значення температури в градусах Кельвіна,  $Cp$  ( Дж/кгК),  $RSu$  (кг/м<sup>3</sup>),  $LD$  (Вт/мК) – відповідно розраховані значення питомої ефективної теплоємності, фізичної густини та коефіцієнту теплопровідності. Відповідно, процедура

**PROCEDURE ENTHALPY(TK,TCR:extended;****Var I0CR,ICrM,I0T,ITM,I0M,W0M,WTM,WCrM,WCrT:extended);**

для заданих значень температури  $TK$  і температури початку кристалізації води  $T_{кр}$  розраховує значення внесків (інтеграли) в ентальпію плодовоовочевого об'єкту від льоду та води. При цьому  $I0CR$ ,  $ICrM$ ,  $I0T$ ,  $ITM$ ,  $I0M$  відповідно інтеграли від температурної залежності питомої теплоємності льоду по температурі в границях від температури „нуля“ підрахунку  $T_0 = 233,15$  К до  $T_{кр}$ , від  $T_{кр}$  до температури плавлення льоду  $T_M = 0$  °С, від  $T_0$  до змінної температури плодовоовочевого об'єкту  $TK$ , від змінної температури  $TK$  до  $T_M$ , від  $T_0$  до  $T_M$ .

Розраховані значення **W0M**, **WTM**, **WCrM**, **WCrT** мають аналогічний сенс як інтеграли від температурної залежності для питомої теплоємності рідинної води, в тому числі і в переохолодженому стані.

Нарешті, процедура

**PROCEDURE ENTALbio(J:integer;Tk:extended;VAR IT:extended);**

розраховує внесок (при змінній температурі  $T_k$ ) в ентальпію плодовоовочевого об'єкту від  $j$  – того компонента „сухої“ частини - протеїну, жиру, вуглеводню, клітковини, золи. Цей внесок, на відміну від попередніх, один, оскільки ці компоненти не терплять фазового перетворення в досліджуваному діапазоні температур.

Вхідний масив  $K_{in}$  індивідуальних характеристик (хімічний склад,  $T_{кр}$ ) несе в розрахункову процедуру.

**PROCEDURE WATEROUT(Kin:ED; T:extended; VAR  
WT,DWT:extended);**

значення температури початку кристалізації води  $T_{кр}$  та поточне значення температури  $T$  сировини. Розраховуються відповідні температури  $T$  значення рівноважної частки вимороженої води  $WT$  та її похідної по температурі  $DWT$ .

Кінцевою процедурою розрахунку всього комплексу теплофізичних характеристик плодовоовочевого об'єкту в цілому є процедура

**PROCEDURE XYZPROP(T:extended;Koeff,Coef:ed; var RPH, CE,  
IPT, L, W, DW: extended);**

Тут вхідними виступають поточне значення температури  $T$  сировини та масиви **Koeff,Coef** індивідуальних її характеристик (хімічний склад,  $T_{кр}$ , пористість). В подальшому, при апробації даної методики розрахунків, виникне необхідність аналізу теплофізичних харак-

теристик сировини з різним вологовмістом  $W_{in}$  і, відповідно, різним складом (за масовими концентраціями в сумі  $(1 - W_{in})$ ) „сухої“ її частини. Тому при змінних значеннях  $W_{in}$  відповідні значення масових концентрацій компонент „сухої“ частини перераховуються в масивах **Koef, Coef** пропорційно  $(1 - W_{in})$ .

Вихідними величинами процедури **XYZPROP** є значення **RPH** фізичної густини ( $\text{кг/м}^3$ ), питомої ефективної теплоємності **CE** ( $\text{Дж/кгК}$ ), питомої ентальпії **IPH** ( $\text{Дж/кг}$ ), ефективної теплопровідності (перколяції теплоти,  $\text{Вт/мК}$ ), масової частки вимороженої води **W** та її похідної **DW** ( $\text{K}^{-1}$ ) по температурі. Результати апробації розробленої методики розрахунку температурних залежностей теплофізичних характеристик вибраних плодів та овочів представлені в таблиці 1. Аналогічно, в таблиці 2 наведено співставлення розрахованих та знайдених в літературі експериментальних даних з питомої ефективної теплоємності.

Таблиця 1 - Прийняті значення масових концентрацій основних компонент овочів та температури початку кристалізації води в них

Назва овочів	Вологовміст	$T_{кр.}$ °C	Масова частка					
			білку	жиру	вуглеводнів	клітковини	золи	атм. газів
Гарбуз	0,9160	- 0,80	0,0094	0,0009	0,0613	0,0047	0,0076	$16,0 \cdot 10^{-5}$
Кабачки літні	0,9420	- 0,50	0,0071	0,0018	0,0304	0,0143	0,0044	$8,6 \cdot 10^{-5}$
Кабачки зимові	0,8778	- 0,80	0,0071	0,0009	0,0928	0,0134	0,0080	$8,7 \cdot 10^{-5}$
Баклажани	0,9100	- 0,90	0,0120	0,0010	0,0590	0,0130	0,0050	$39,0 \cdot 10^{-5}$
Солодкий перець	0,9219	- 0,70	0,0072	0,0015	0,0523	0,0146	0,0024	$19,0 \cdot 10^{-5}$
Кукурудза мол. стигл.	0,7596	- 0,60	0,0289	0,0106	0,1710	0,0243	0,0056	$34,0 \cdot 10^{-6}$

Як видно з результатів, наведених у табл. 2 розходження розрахованих та експериментальних даних знаходиться для усіх досліджених овочів в межах похибки експериментальних даних, хоч конкретний хімічний склад, крім вологовмісту, для використаних експериментальних даних невідомий. Це надає можливість зробити висновок про те, що розроблена методика дозволяє розраховувати ефективну питому теплоємність всього дослідженого переліку овочів з похибкою, яка не перевищує 8 – 10 % у всьому інтервалі температур від мінус 40 °C до плюс 40 °C.

Таблиця 2 - Порівняння розрахункових та експериментальних даних різних авторів з ефективною теплоємністю овочів.

Назва овочів	Т, °С	W <sub>in</sub>	T <sub>кр</sub> , °С	С <sub>p</sub> , Дж/кг·К		Відхилення, %	Джерело експер. даних
				експер. дані	розрахунок		
Гарбуз	- 40,0	0,916	- 0.80	1810,0	1925.5	- 6,38	[4]
	25,0	0,916	- 0.80	3970,0	3968,0	0,05	[4]
	25,0	0,905	- 0.80	3920,0	3940,0	- 0,51	1
Кабачки літніх сортів	- 40,0	0,942	- 0.50	1740,0	1896,8	- 9,01	[4]
	25,0	0,942	- 0.50	4070,0	4034,8	0,87	[4]
	40,0	0,949	- 0.50	4020,0	4050,2	- 0,75	[1]
	40,0	0,949	- 0.50	4040,0	4050,2	- 0,25	[1]
	23,0	0,944	- 0.50	3951,0	4040,3	- 2,26	[1]
	23,0	0,936	- 0.50	3458,0	4019,8	- 16,25	[1]
Кабачки зимових сортів	26,0	0,877	- 0.80	3580,0	3868,3	- 8,05	[1]
	- 40,0	0,878	- 0.80	1870,0	1907,5	- 2,01	[4]
	25,0	0,878	- 0.80	3890,0	3870,5	0,50	[4]
	- 40,0	0,8056	- 0.80	2160,0	2338,5	- 8,27	[4]
	25,0	0,8056	- 0.80	3700,0	3686,2	0,37	[4]
	35,0	0,820	- 0.80	3768,0	3721,3	1,24	[4]
	- 35,0	0,784	- 0.80	1842,0	2505,6	- 36,03	[1]
	30,0	0,818	- 0.80	3601,0	3717,3	- 3,23	[1]
	20,15	0,795	- 0.80	3620,0	3658,7	- 1,07	[1]
20,15	0,836	- 0.80	3840,0	3763,9	1,98	[1]	
Баклажани	- 40,0	0,9203	- 0.80	1830,0	1931,7	- 5,56	[4]
	25,0	0,9203	- 0.80	4020,0	3983,2	0,91	[4]
	- 40,0	0,9200	- 0.80	2010,0	1931,6	3,90	[4]
	25,0	0,9200	- 0.80	3940,0	3982,5	- 1,08	[4]
	25,0	0,908	- 0.90	4047,0	3939,8	2,66	[1]
	25,0	0,944	- 0.90	4221,4	4042,7	4,23	[1]
	25,0	0,927	- 0.90	3935,0	4000,0	- 1,65	[3]
	- 40,0	0,927	- 0.90	2010,0	1947,8	3,09	[3]
Перець солодкий	- 40,0	0,9219	- 0.70	1800,0	1919,7	- 6,65	[4]
	25,0	0,9219	- 0.70	4010,0	3988,0	0,55	[4]
	- 40,0	0,930	- 0.70	1840,0	1922,9	- 4,50	[4]
	25,0	0,930	- 0.70	3810,0	4008,2	- 5,20	[4]
	25,0	0,924	- 0.80	3940,0	3993,2	- 1,35	[2]
Кукурудза молочної стиглості	- 40,0	0,760	- 0.60	1980,0	1845,8	- 6,78	[4]
	25,0	0,760	- 0.60	3620,0	3582,7	1,03	[4]
	- 40,0	0,740	- 0.60	1760,0	1838,4	- 4,46	[4]
	20,0	0,740	- 0.60	3310,0	3532,9	- 6,73	[4]

При уточненні (в умовах реального промислового виробництва) хімічного складу та температури початку кристалізації води для виділеної партії сировини наведена похибка розрахункових даних може бути

суттєво знижена. Відповідно, за розрахунковими даними можуть бути скоректовані енерговитрати виробництва заморожених овочів, технологічні параметри процесу заморожування.

Наявний об'єм експериментальних даних з фізичної густини досліджених овочів надто малий для проведення насиченої статистичної оцінки похибки моделювання, експериментальні дані тут не відображають фізичну густину у від'ємній області температур (табл. 3). Тому похибку моделювання за адитивною по питомих об'ємах компонент фізичною густиною овочів можливо оцінити величиною до 10 %.

Таблиця 3 - Порівняння розрахункових та експериментальних даних різних авторів з фізичної густини овочів.

Назва овочів	T, °C	W <sub>in</sub>	T <sub>кр</sub> , °C	R <sub>o</sub> , кг/м <sup>3</sup>		Відхилення, %	Джерело експер. даних
				експер. дані	розрахунок		
Гарбуз	25,0	0,905	- 0,80	954,0	1002,7	- 5,10	[1]
Кабачки літніх сортів	23,0	0,936	- 0,50	970,0	991,8	- 2,25	[1]
	40,0	0,949	- 0,50	995,0	980,7	1,44	[1]
	40,0	0,949	- 0,50	9040,0	980,7	- 8,48	[1]
Кабачки зимових сортів	26,0	0,877	- 0,80	950,0	1012,3	- 6,56	[1]
	20,15	0,795	- 0,80	1068,0	1067,0	0,10	[1]
	20,15	0,836	- 0,80	1040,0	1050,7	- 1,03	[1]
Баклажани	25,0	0,9080	- 0,90	903,0	903,5	- 0,05	[1]
	25,0	0,944	- 0,90	716,0	893,5	- 24,78	[1]
Перець сол.	25,0	0,924	- 0,70	967,0	1014,6	- 4,92	[4]
Кукурудза мол. стигл.	20,15	0,795	0,60	1068,0	1061,3	0,63	[4]

З іншого боку, необхідність контролю втрат маси овочів при їх переробці та холодильній обробці, а також при холодильному зберіганні, необхідність розробки комп'ютеризованих методів такого контролю посилює актуальність підвищення ефективності математичного моделювання процесів холодильної обробки, зокрема, опису і контролю фізичної густини овочів конкретного урожаю.

Для значень ефективної теплопровідності (перколяції теплоти) при від'ємних температурах ми не маємо для досліджених овочів ніяких, хоч в малій мірі достовірних експериментальних даних. У додатній області температур такі дані мають суттєво малий об'єм і представлені у порівнянні з розрахунковими в табл. 4.

Таблиця 4 - Порівняння розрахункових та експериментальних даних різних авторів з ефективної теплопровідності (перколяції теплоти) овочів.

Назва овочів	Т, °С	W <sub>in</sub>	T <sub>кр</sub> , °С	λ, Вт/м·К		Відхилення, %	Джерело експер. даних
				експер. дані	розрахунок		
Гарбуз	25,0	0,905	- 0,80	0,470	0,471	- 0,12	1
Кабачки літніх сортів	23,0	0,936	- 0,50	0,53	0,518	2,23	1
	23,0	0,944	- 0,50	0,60	0,519	13,44	1
	40,0	0,949	- 0,50	0,68	0,538	20,82	1
	40,0	0,949	- 0,50	0,33	0,538	- 63,15	1
Кабачки зимових сортів	26,0	0,877	- 0,80	0,50	0,510	- 1,96	1
	20,15	0,795	- 0,80	0,51	0,53	- 3,40	1
	20,15	0,836	- 0,80	0,52	0,540	- 3,98	1
Баклажани	25,0	0,908	- 0,90	0,38	0,374	1,56	1
	25,0	0,944	- 0,90	0,35	0,378	- 8,01	1
	25,0	0,917	- 0,90	0,37	0,375	- 1,40	1
Перець сол.	25,0	0,924	- 0,80	0,50	0,46	8,75	1
Кукурудза мол. стигл.	20,15	0,795	- 0,60	0,51	0,508	0,44	4

Враховуючи невизначеність пористості та структурних неоднорідностей зразків, які використовувались авторами при одержанні експериментальних даних, наведені відхилення слід вважати задовільними, а граничну похибку знову оцінити значенням 10 %. З іншого боку, експериментальні дані з ефективної теплопровідності солодкого перцю та кукурудзи молочної спілості по суті відсутні. Тому одержані дані з фізичної густини та ефективної теплопровідності солодкого перцю та кукурудзи молочної спілості слід розглядати як прогноз в рамках розробленої загальної методики, що апробована на експериментальних даних для інших овочів.

Висновки: Одержані температурні залежності для теплофізичних характеристик овочів може бути рекомендована для розрахункового аналізу відповідного обладнання, корегування даних з теплофізичних характеристик та режимних параметрів технології переробки за результатами контрольних вимірювань параметрів сировини, що поступає на підприємство з виробництва замороженої продукції.

Література:

1. *Zisiewska Z.* Effect of storage period and temperature on the chemical composition and organoleptic quality of frozen tomato cubes / *Z. Zisiewska, W. Kmiesik* // *Food Chem.* – 2000. – Vol. 70, № 2. – P. 167–173.

2. *Гинзбург А. С.* Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов / *А.С. Гинзбург, М.А. Громов* . – М. : Агропромиздат, 1987. – 272 с.

3. *Чубик И. А.* Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов / *И. А. Чубик, А. М. Маслов* . - М.: Пищевая промышленность, 1970. – 184 с.

4. *Гинзбург А. С.* Влага в зерне / *А. С. Гинзбург, В. П. Дубровский, Е. Д. Казаков* . – М. : Колос, 1969. – 224 с.

### **ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЫКВЫ, КАБАЧКОВ, КУКУРУЗЫ МОЛОЧНОЙ СПЕЛОСТИ И СЛАДКОГО ПЕРЦА И ИХ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ**

В.Ф. Ялпачик

**Аннотация** - работа посвящена разработке алгоритма решения расчета теплофизических характеристик сельскохозяйственной продукции. Данное сопоставление расчетных и найденных в литературе экспериментальных данных с удельной эффективной теплоемкости, погрешность не превышает 8-10% во всем интервале температур.

### **THERMAL CHARACTERISTICS PUMPKIN, ZUCCHINI, CORN MAMMARY RIPENESS AND SWEET PEPPER AND FORECASTING**

V. Yalpachyk

#### **Summary**

Is devoted to the development of algorithm for solving the calculation of thermal characteristics of agricultural products. This comparison of the calculated and found in the literature experimental data on effective specific heat capacity, the error does not exceed 8.10% in the whole temperature range.