ЖУРНАЛ ФІЗИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
т. 1, 2 (1997) с. 225–231

JOURNAL OF PHYSICAL STUDIES
v. 1, No 2 (1997) p. 225–231

ПЕРКОЛЯЦІЙНИЙ ПЕРЕХІД, ЗУМОВЛЕННИЙ УТВОРЕННЯМ ЛЬОДУ В БУРЯКОВІЙ ТКАНИНІ

Л. А. Булавін, Ю. Ф. Забашта, А. Я. Фрідман, А. І. Костюк
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет
Україна, UA–252017, Київ, вул. Володимирська, 64
(Отримано 23 травня 1996)

Одержано температурну залежність модуля зсуву для цукрового буряка в інтервалі температур 220–280 К. Виявлено існування перколяційного переходу при температурі 251 К, зумовленого виникненням безмежного жорсткого кластера в буряковій тканині. За допомогою теорії перколяції за температурною залежністю модуля зсуву розраховано кількість льоду в цукровому бурякові при температурах нижче температури переходу.

Експериментально підтверджено гіпотезу про існування механізму міжклітинного вимерзання. Показано, що охолодження бурякової тканини до 251 К не призводить до руйнування клітин.

Ключові слова: модуль зсуву, паренхімна тканина, безмежний кластер, перколяційний перехід, міжклітинники, цукровий буряк.

PACS number(s): 62.20.Dc

I. ВСТУП

Як відомо, цукровий буряк — важлива культура для економіки України. Здавалось б уже цього є достатньо, щоб почати цілеспрямовані фізичні дослідження цього об'єкту. На жаль, для фізиків цукровий буряк як об'єкт дослідження є незвичайним та незвичним.

Властивості цукрового буряка в Україні вивчали головним чином технологи (див., наприклад, [1]). Природно, що фізичний аспект проблеми при цьому був на другому плані.

Загалом спроби вивчати властивості цукрового буряка з погляду фізики були [2]. Але це — окремі праці, які поки що не в силі подолати загальної тенденції.

З багатьох фізичних проблем, що стосуються цукрового буряка, ми вибрали питання про кількість льоду в замерзлому при заданій температурі бурякові. Якщо ввести такі позначення: V — об'єм системи, V_i — об'єм льоду, T — температура і величину $n_i = V_i/V$, то йдеться про визначення залежності $n_i(T)$.

Це питання здавна цікавить практиків, бо від нього значною мірою залежать температурні режими, що їх необхідно дотримуватись для зберігання буряків. Розглянемо його з використанням фізичного підходу, а саме: застосуємо моделі, звичайно вживані у фізиці твердого тіла. В цьому, як видається нам, і полягає один з елементів новизни статті.

II. КОРОТКИЙ АНАЛІЗ ПРАЦЬ, В ЯКИХ РОЗГЛЯНУТО ПРОЦЕС ЗАМЕРЗАННЯ ЦУКРОВОГО БУРЯКА. ВИБІР ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МЕТОДУ

Першою спробою з визначення кількості льоду у цукровому бурякові була, як відомо авторам, праця [3]. У ній використано калориметричний метод. Зразок розміщували в термостаті з температурою 253 К, деякий час витримували там, після чого вимірювали загальну кількість тепла Q, необхідного для відігрівання замерзлого буряка до кімнатної температури. Вважалося, що буряк є сумішшю води і так званої сухої речовини (останнім терміном, як відомо, технологи називають залишок, що його одержують після повного висушування бурякової тканини). Вводили величини $n_d = V_d/V$, $n_i^{'} = V_i/V_w$, де V_d і V_w — об'єми, зайняті відповідно сухою речовиною та водою. Було записано формулу для Q, яка містить, крім температури, теплоємність C_d сухої речовини, а також величини n_d та $n_i^{'}$. Із цієї формули за експериментальним значенням Q, n_d та C_d обчислювали $n_i^{'}(253)$ для $T = 253$ К. Було одержано значення $n_i^{'}(253) = 0.8$.

На відміну від [3], в публікації [4] було виконане пряме вимірювання теплового ефекту, пов'язане з утворенням льоду в буряковій тканині. Використано метод низькотемпературної диференціальної скануючої калориметрії. Зразки охолоджували до температури 123 К зі швидкістю 32 К/хв. Після цього в умовах поступового нагрівання знімали термограми. Для зразка із кількістю (за масою) сухої речовини 25% максимум плавлення спостерігався при $T = 269$ К.

Вимірювання теплового ефекту, пов'язаного з цим максимумом, дало значення $n_i^{'}(123) = 0.4$, $n_i(123) = 0.3$.

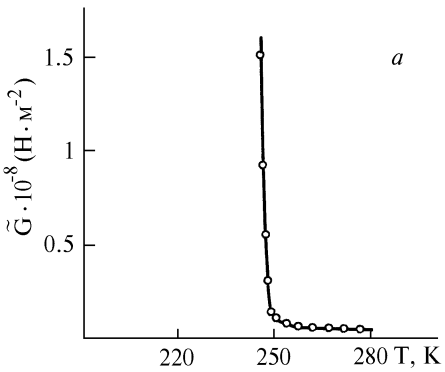
Спосіб охолодження, який було застосовано в [3] (занурювання в термостат), дає підстави стверджувати, що швидкість охолодження в дослідженні [4] була нижчою, ніж в експерименті [3]. Крім того, і температура (123) була в першому випадку нижчою, ніж у другому (253). І не зважаючи на це, значення $n_i^{'}$ в [4] виявилось майже вдвічі меншим порівняно з [3].

Ми схильні більше довіряти данним праці [4], бо в ній виконано пряме вимірювання теплового ефекту, пов'язане з утворенням льоду. В [3] цей ефект визначали, причому розрахунок ґрунтувався на занадто спрощеній моделі (буряк = суха величина + вода).

Як видно з наведених праць, завдання, що нас цікавить, — знаходження залежності $n_i(T)$ — не розглядали.

Нам видається доречним для її вивчення використати вимірювання пружного модуля зсуву. Застосування цього методу в цьому випадку має сенс завдяки величезній різниці між модулями зсуву льоду та води, що, в принципі, повинно дати змогу визначати кількість першого досить точно.

Пружність цукрового буряка, як звичайно, досліджували в інтервалі кімнатних температур і вище (див., наприклад, [5]). У літературі [6] згадується про окремі вимірювання в інтервалі низьких температур (при 257 K). Ми ж вели дослідження в цьому інтервалі температур (200–280 K) систематично. В цьому полягає другий елемент новизни статті.



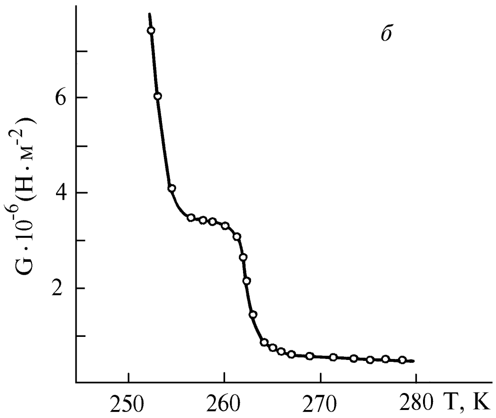


Рис. 1. Температурна залежність динамічного модуля зсуву паренхімної тканини цукрового буряка; а — всі точки експериментальної кривої $\tilde{G}(T)$ в малому масштабі, б — початкова частина цієї кривої для температурного інтервалу 250–280 K у великому масштабі ($G(T)$).

III. ЕКСПЕРИМЕНТ

Експериментально ми вимірювали пружний модуль в інтервалі температур 200–280 K.

Об'єктом дослідження була паренхімна тканина цукрового буряка "Уладовка" з цукристістю 16% та кількістю сухої речовини 25% (за масою).

Пружний модуль зсуву G вимірювали за допомогою оберненого крутильного маятника [7] на частоті 0.01 Гц. Вимірювання проводили при безперервному охолодженні зразка, що відбувалося зі швидкістю 0.5 град./хв.

Перше із результатів експерименту, що впадає в око: одержані значення розрізняються на два порядки. Це не дало змоги навести єдину залежність $G(T)$: довелося зобразити усю криву в дрібному масштабі (рис. 1, а), а частину цієї кривої у великому (рис. 1, б), щоб показати деталі залежності $G(T)$ в температурному інтервалі 250–280 K. Дрібномасштабну залежність модуля надалі позначатимемо як $\tilde{G}(T)$, залишивши за великомасштабною залежністю $G(T)$.

Як видно з рис. 1, на графіку кривої $G(T)$ спостерігаються дві особливості: високотемпературний (при $T = T_1 = 261$ K) та низькотемпературний (при $T = T_0 = 251$ K) стрибки.

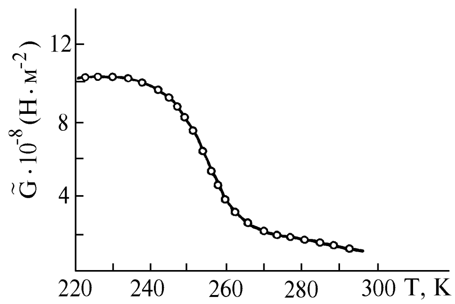


Рис. 2. Температурна залежність динамічного модуля зсуву засушеної паренхімної тканини цукрового буряка.

Оскільки буряк, як і інші живі організми, містить велику кількість води, перше, що спадає на думку: стрибки, що спостерігаються, викликані утворенням льоду.

Для перевірки цього припущення було виміряно модуль висушених зразків — "сухої речовини" (рис. 2). З рис. 2 видно, що на залежності $G(T)$ є стрибок при $T = 261$ K і нема стрибка при $T = 251$ K. Тому можна зробити висновок, що високотемпературний стрибок, що його спостережено для невисушеної бурякової тканини, не пов'язаний з утворенням льоду і, навпаки, низькотемпературний стрибок своєю появою зобов'язаний утворенню льоду.

IV. ПЕРКОЛЯЦІЙНИЙ ХАРАКТЕР НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО СТРИБКА

Надалі нас цікавитиме фізичний механізм, що призводить до появи низькотемпературного стрибка. Будемо шукати відповідь на це питання, використовуючи континуальну модель структури, запозичену з теорії пружності мікронеоднорідних середовищ [8].

У цій теорії, як відомо, вводиться поняття локального модуля $g(\mathbf{x})$ в точці $\mathbf{x}$, так що вимірюваний модуль являє собою деяке ефективне усереднене значення $\bar{g}$. Величина $g(\mathbf{x})$ вважається випадковою. Характеристикою середовища є кореляційна функція $K(\mathbf{x},\mathbf{x}')$, що визначається формулою

$$K(\mathbf{x},\mathbf{x}') =< g(\mathbf{x})g(\mathbf{x}') > - < g >^2, \qquad (1)$$

де $< \dots >$ — оператор усереднення.

Характерним лінійним розміром є радіус кореляції a, що визначається співвідношенням

$$\begin{aligned} K(\mathbf{x},\mathbf{x}') &\neq 0 \qquad |\mathbf{x}-\mathbf{x}'| < a, \\ K(\mathbf{x},\mathbf{x}') &= 0 \qquad |\mathbf{x}-\mathbf{x}'| > a. \end{aligned} \qquad (2)$$

Цю модель використовують щодо різноманітних неоднорідних матеріалів, у тому числі й для опису пружної поведінки композита, що являє собою суміш двох фаз. Нехай перша з них існує у вигляді кластерів, а друге відіграє роль матриці. В цьому випадку радіус кореляції за порядком величини збігається з розміром кластера першої фази.

Вважатимемо, що виконується умова

$$G_h >> G_s, \qquad (3)$$

де G_h і G_s — модулі пружності відповідних фаз композита. Згідно з цією нерівністю першу фазу називатимемо "жорсткою", а другу — "м'якою".

Позначимо через V_h об'єм, що його займає жорстка фаза, а також введемо позначення $n_h = V_h/V$ для відносного об'єму, зайнятого цією фазою.

Збільшення n_h призводить до того, що розташування новоутворень жорсткої фази щораз більше залежить від розташування агрегатів жорсткої фази, що утворилися раніше. Це означає, що зі збільшенням n збільшується радіус кореляції a. При певному значенні $n_h = n_{h_0}$ величина a досягає розміру зразка (умовно кажуть, що кластер жорсткої фази досягає безмежного розміру). Іншими словами, в системі виникає каркас, який складається з жорсткої фази і приймає на себе зовнішнє навантаження. Завдяки цьому при $n_h = n_{h_0}$ буде спостерігатися стрибок модуля $\bar{g}$, що можна зобразити в аналітичній формі як співвідношення

$$\begin{aligned} \bar{g}_l &\sim 0 \qquad (n_h < n_{h_0}), \\ \bar{g}_f &\gg \bar{g}_l \qquad (n_h > n_{h_0}), \end{aligned} \qquad (4)$$

де позначення $\bar{g}_l$ і $\bar{g}_f$ введено для модулів в інтервалах $n_h < n_{h_0}$ і $n_h > n_{h_0}$. Якщо існує співвідношення типу (4), то прийнято вживати терміни "перколяційний перехід" (щодо величини $\bar{g}$), "поріг перколяції" (величина n_{h_0}), що їх взято з теорії перколяції [9]. Ця теорія дає для величини $\bar{g}_f$ формулу

$$\bar{g}_f = b(n_h - n_{h_0})^t, \qquad (5)$$

де b і t — сталі (див. також [10]). Показник t називається критичним індексом.

Застосуємо наведені міркування для опису пружної поведінки бурякової тканини, що охолоджується нижче температури 273 K — температури замерзання води у вільному стані. Очевидно, що раніше чи пізніше частина води перетворюватиметься у лід, що приведе до зледеніння бурякової тканини. Оцю заледенілу бурякову тканину і вважатимемо жорсткою фазою, про яку йшлося раніше. Частину ж тканини, де нема зледеніння, будемо розглядати як м'яку фазу. Відповідно з такого погляду бурякова тканина буде двофазним композитом, для якого з очевидністю виконується умова (3). Оскільки виміряний модуль $\tilde{G}$ для бурякової тканини за змістом збігається з величиною $\bar{g}$ для використаної нами моделі, ми можемо переписати співвідношення (4) у вигляді

$$\begin{aligned} \tilde{G}_l &\sim 0 \qquad (n_h < n_{h_0}), \\ \tilde{G}_f &\gg \tilde{G}_l \qquad (n_h > n_{h_0}). \end{aligned} \qquad (6)$$

Зважаючи на те, що n залежить від температури, вираз (6) можна також записати як

$$\begin{aligned} \tilde{G}_l &\sim 0 \qquad T > T_0, \\ \tilde{G}_f &\gg \tilde{G}_l \qquad T < T_0, \end{aligned} \qquad (7)$$

увівши в розгляд критичну температуру T_0 — "температурний" поріг перколяції.

Отже, згідно з виразом (7) a priori нам відомо, що повинна існувати температура T_0, щодо якої виконується умова (7), тобто нам відомо, що при деякій температурі повинен спостерігатися перколяційний перехід стосовно величини $\tilde{G}$. В експерименті ми спостерігаємо при деякій температурі стрибок модуля, що описується співвідношенням (7). Крім того, нам відомо, що ніяких структурних переходів в околі температури T_0 немає (температура плавлення згідно з [4] дорівнює 269 K; структура льоду незмінна, не змінюється і структура "м'якої фази", як це видно з рис. 2). Тож нам нічого не залишається, як стверджувати, що низькотемпературний стрибок модуля $\tilde{G}$ є перколяційним переходом і спричинений тим, що кластер жорсткої фази при температурі T_0 досягає розмірів зразка.

Характерно, що цей висновок ми одержали за допомогою феноменологічної теорії, в якій аж ніяк не враховано специфічну будову моделі тканини живого організму. Тож перехід, про який йдеться, теж не є чимось специфічним, властивим тільки рослинній тканині. В принципі він повинен існувати в будь-якій суміші двох фаз — тільки б виконувалась умова (3).

V. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ КІЛЬКОСТІ "ЖОРСТКОЇ" ФАЗИ

З'ясувавши, що низькотемпературний стрибок викликаний перколяційним переходом, ми одержуємо право скористатися залежністю (5), щоб отримати аналітичну форму залежності $\tilde{G}_f(T)$.

Для цього розкладемо функцію $n_h(T)$ в ряд за степенями $(T - T_0)$, обмежуючись членом першого степеня

$$n_h = n_{h_0} + \frac{dn_h}{dT}(T_0)(T - T_0). \qquad (8)$$

Підставивши вираз (8) у формулу (5), одержимо співвідношення

$$\tilde{G}_f(T) = Q(T - T_0)^t, \qquad (9)$$

де $Q = b\left(\frac{dn_h}{dT}(T_0)\right)^t$.

Скориставшись цим співвідношенням, визначимо з нашого експерименту критичний індекс t. Для цього побудуємо за експериментальними значеннями залежність $\ln\tilde{G}_f$ від $\ln|T - T_0|$ (рис. 3). Апроксимація цієї залежності методом найменших квадратів дає значення $t = 1.48 \pm 0.02$.

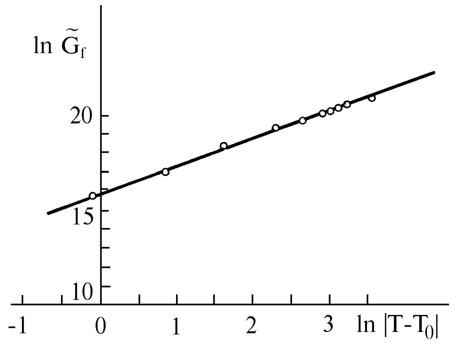


Рис. 3. Залежність $\ln\tilde{G}_f$ від $\ln|T - T_0|$ для паренхімної тканини цукрового буряка.

З теорії перколяції [9] відомо, що для тривимірних регулярних сіток (ґраток) величина n_{h_0} становить 0.15. Вважають, що цю оцінку можна прийняти також, коли мають справу із випадковими сітками або, що фактично те ж саме, з випадковими мікронеоднорідними середовищами. Тож і в нашому випадку логічно прийняти для відносного об'єму n_{h_0}, що його займає жорстка фаза, ту ж оцінку.

Тепер у формулі (5) нам відомі значення величини t і n_{h_0}. Не вистачає лише числового значення величини b, щоб цю формулу можна було б використати для розрахунку кількості жорсткої фази в системі.

Зважаючи на очевидну умову

$$\tilde{G} \to G_h \qquad (n_h \to 1) \qquad (10)$$

і припускаючи, що формула (5) справедлива в усьому інтервалі $[1, n_{h_0}]$, перепишемо цю формулу у вигляді

$$\tilde{G} = G_h[(n_h - n_{h_0})/(1 - n_{h_0})]^t. \qquad (11)$$

З виразу (11) отримуємо формулу для визначення кількості жорсткої фази в системі:

$$n_h = n_{h_0} + (1 - n_{h_0})(\tilde{G}/G_h)^{1/t}. \qquad (12)$$

VI. МЕХАНІЗМ УТВОРЕННЯ ЛЬОДУ В БУРЯКОВІЙ ТКАНИНІ І РОЗРАХУНОК КІЛЬКОСТІ ЛЬОДУ В СИСТЕМІ

Яке числове значення надати величині G_h, залежатиме від того, якого конкретного змісту ми надаємо термінові "жорстка фаза" або, як її ми вже називали, "зледеніла бурякова тканина".

Як уже згадувалось, використану в цій статті континуальну модель можна буде застосувати і під час розгляду фазового переходу "вода–лід" в неживих системах. У цьому випадку не виникає ніяких сумнівів щодо того, що вважати жорсткою фазою: вона складається тільки з льоду.

Будемо вважати, що ця ознака неживих систем властива і буряковій тканині. Це припущення запишемо у вигляді системи рівностей

$$n_h = n_i, \tag{13}$$

$$G_h = G_i, \tag{14}$$

де G_i — модуль зсуву льоду.

Відповідно формула (12) набуде вигляду

$$n_i = n_{h_0} + (1 - n_{h_0})(\tilde{G}/G_i). \tag{15}$$

Вводячи згадане припущення, ми таким чином іґноруємо вплив специфічної структури живої тканини на процес фазового переходу. Фактично ми вважаємо, що в буряковій тканині льодові аґреґати розростаються, не обминаючи ніяких елементів структури, і в лід виявляються вмороженими і стінки клітин, і внутрішньоклітинні мембрани, і різноманітні органели тощо. З цієї причини механізм, про який йдеться, доречно назвати механізмом тотального вимерзання.

Згідно з табличними даними для величини G_i приймаємо значення $3.5 \cdot 10^9$ Па. Підставляючи його в (15) разом із згаданими раніше числовими значеннями t і n_{h_0}, одержуємо залежність $n_i(T)$, графік якої показано на рис. 4, а.

Із цього графіка видно: якщо продовжувати охолодження до температури 123 K, то ми одержали б значення n_h, яке значно перевищило б експериментальне значення 0.3, що його отримано в [4]. Це спонукає відмовитись від уже наведеного механізму.

Біологи [11] віддають перевагу іншому механізмові, що його можна було б назвати механізмом міжклітинного вимерзання. Живий організм намагається запобігти утворенню льоду в клітині, бо це одночас початок її загибелі. Частина води з клітини переходить в міжклітинники, де й замерзає.

Унаслідок цього в системі виникають льодові прошарки, що відділяють одну клітину від іншої.

Якщо прийняти цей механізм, то як жорстку фазу, про яку йшлося раніше, слід розглядати вже сукупність клітин, кожна з яких оточена льодовим прошарком. Таку структуру можна було б назвати "сотовою", де матеріалом сот є лід. Середину заповнює матеріал, який можна розглядати як водний розчин або водну емульсію.

У цій структурі лід займає тільки частину об'єму, зайнятого жорсткою фазою. Введемо позначення $X = V_i/V_h$. Помноживши і поділивши праву частину останньої рівності на V, одержимо формулу

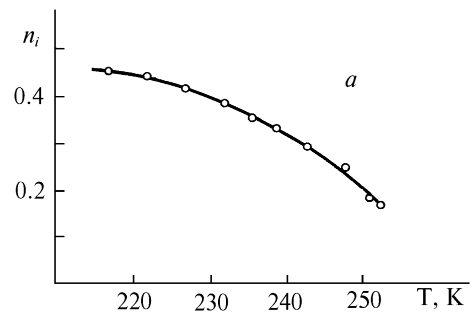
$$n_i = X n_h. \tag{16}$$

Модуль G_h одержують усередненням за об'ємом, зайнятим жорсткою фазою. В моделі цієї фази, що її ми розглядаємо зараз, остання, як уже зазначалось, містить поряд із льодом також рідину. Оскільки модулем зсуву рідини можна знехтувати порівняно із модулем зсуву льоду, то усереднення за об'ємом, де нема льоду, практично не впливає на модуль G_h, що дає змогу записати

$$G_h = X G_i. \tag{17}$$

Підставляючи формули (16), (17) у вираз (12), одержуємо

$$n_i = X n_{h_0} + (1 - n_{h_0})(\tilde{G}/G_i)^{1/t} X^{(t-1)/t}. \tag{18}$$



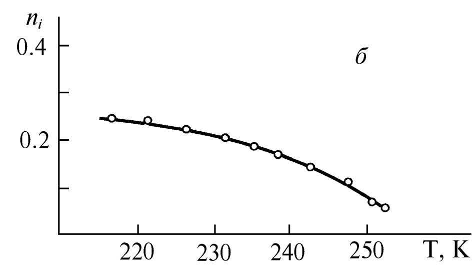


Рис. 4. Температурна залежність кількості льоду в буряковій тканині при температурах, нижчих температури перколяційного переходу.

Оцінимо величину X. Для цього наближено вважатимемо, що клітина має форму куба. Позначимо довжину ребра через L, товщину льодового прошарка, що розділяє клітини, — через h. Тоді об'єм льоду, що припадає на одну клітину, становитиме $6L^2h/2$ і для величини X виявляється справедливою оцінкою

$$X \simeq 3h/L. \tag{19}$$

Як свідчить література, ми поки що не маємо жодної змоги оцінити величину h. Одне очевидно: вона повинна бути суттєво меншою від L. У цій невизначеній ситуації найбільш логічно, мабуть, вважати, що h на порядок менше, ніж L, тобто

$$h \simeq 0.1L, \tag{20}$$

що дає значення $X \simeq 0.3$.

До речі, при $n_h = 1$, тобто коли жорстка фаза, про яку йдеться, захоплює весь об'єм системи, ми отримуємо значення $n_i = 0.3$, тобто саме те значення, що його одержано експериментально в [4] під час глибокого охолодження системи, коли створено всі умови для розповсюдження жорсткої фази на всю систему. Цей факт можна трактувати як деякий аргумент на користь припущення (20).

Використавши одержане числове значення X, будуємо графік залежності $n_i(T)$ за формулою (19) (рис. 4, б). Ця залежність і є відповіддю на поставлене в нашій статті питання.

VII. ВИСНОВОК

Підсумуємо результати виконаного нами дослідження, спробувавши відповісти на запитання, що нового дає це дослідження для розуміння фізичних процесів, які відбуваються в буряковій тканині під час її замерзання. Для цього коротко повторимо наведені вище міркування.

Ми під час замерзання бурякової тканини спостерігали перколяційний перехід. Ця обставина накладає певні вимоги на поведінку величини n_i (об'ємної концентрації льоду) в околі точки переходу. Особливості цієї, вивченої нами поведінки узгоджуються із даними попередніх досліджень, а саме: праці [4], лише тоді, коли "працює" механізм міжклітинного вимерзання. Тож, наше дослідженння можна розглядати як ще одне, нове експериментальне підтвердження існування цього механізму.

Новою звичайно є одержана інформація про кількість льоду, що утворюється в системі при певній температурі.

Зрозуміло, що замерзання бурякової тканини не обмежується тільки виникненням "сотової" структури. При певній концентрації льоду повинно початися потовщення стінок соти, яке зрештою призведе до руйнування оболонки клітини і заповнення льодом всього об'єму, зайнятого клітиною, тобто до загибелі клітини. Цей процес можна розглядати як заміну "сотової" жорсткої фази суцільною льодовою фазою, властивою механізмові "тотального" вимерзання.

Процес потовщення стінок починає переважати над процесом утворення "сотової" структури, коли зникають сприятливі умови для виникнення останньої. Це відбувається, коли недостатньою стає кількість порожніх (незалежних) міжклітинників.

Утворення безмежного кластера, що складається із "сотового" матеріалу, є першим сигналом про вичерпання порожніх міжклітинників. До того моменту кількість останніх достатня, щоб забезпечити утворення льоду лише за рахунок виникнення "сотової" структури. Тому величину $n_i = Xn_{h_0}$ можна трактувати як верхню межу концентраційного інтервалу, де замерзання не руйнує клітин. Отже, з нашого дослідження випливає, що охолодження цукрового буряка до температури 251 K не спричинює руйнування клітин.

[1] М. П. Купчик, В. В. Манк, А. Б. Матвиенко, *Новые способы итенсификации технологических процессов свеклосахарного производства* (АгроНИИТЭИПП, Москва, 1988).

[2] И. С. Гулый, Н. И. Лебовка, В. В. Манк, *Научные и практические проинципы электрической обработки пищевых продуктов и материалов* (УкрИНТЭИ, Киев, 1994).

[3] В. З. Жадан, М. З. Хелемский, Сахарная промышленность, № 9, 26 (1963).

[4] Е. О. Давыдова, Автореф. дис. канд. техн. наук (КТИИП, Киев, 1992).

[5] И. А. Ерошенко, Автореф. канд. техн. наук (КТИИП, Киев, 1992).

[6] М. З. Хелемский, *Хранение сахарной свеклы* (Пищепромиздат, Москва, 1964).

[7] А. З. Голик, А. Ф. Лопан, Укр. фіз. журн. **12**, 991 (1967).

[8] Т. Д. Шермергор, *Теория упругости микронеоднородных сред* (Наука, Москва, 1977).

[9] Дж. Займан, *Модели беспорядка* (Мир, Москва, 1982).

[10] Л. А. Булавін, А. В. Чалий, В. В. Іваницький, Укр. фіз. журн. **37**, 1182 (1992).

[11] В. А. Полевой, *Физиология растений* (Высшая школа, Минск, 1985).

PERCOLATION TRANSITION, STIPULATED BY THE GENERATION OF ICE IN THE SUGAR–BEET TISSUE

L. A. Bulavin, Yu. F. Zabashta, A. Ya. Fridman, A. I. Kostyuk
Kyiv Shevchenko University, Department of Physics
64 Volodymyrska Str., Kyiv, UA–252017, Ukraine

The temperature dependence of sugar-beet parenchyma tissue dynamic shear modulus has been studied. The dynamic shear modulus investigation was performed employing low frequency reverse torsional pendulum at the temperature ranging from 200 to 280 K. Percolation transition (T_0 = 251 K), stipulated by the generation of ice in the sugar-beet tissue, is discovered. The quantity of ice in the sugar-beet at the temperatures lower than the percolation transition temperature was calculated on the dynamic shear modulus temperature dependence in terms of the percolation theory. It is concluded that this transition corresponds to the appearance of an infinite ice cluster. One can maintain that the sugar-beet survives above the percolation transition temperature.