

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ННУТУ ім. акад. У.С. Гурла  
Кафедра мехатроніки та послувальної техніки

«До захисту в ЕК»

Директор інституту(декан факультету)

Сергій БЛАЖЕНКО  
(підпис) (ім'я та прізвище)

«12» 02 2024р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Володимир КРИВОПЛЯС - ВОЛОДУНА  
(підпис) (ім'я та прізвище)

«12» 02 2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 131 Прикладна механіка

(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми Прикладна механіка

на тему: Дослідження параметрів інфрачервоного нагрівача мехатронного модуля виготовлення полімерної упаковки

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ПМ-2-1М

Луж'янецький Артем Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові повністю)

(підпис)

Керівник Бачка Анатолій Володимирович

(прізвище, ім'я та по батькові повністю)

(підпис)

Консультанти

(ім'я та прізвище)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

(підпис)

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Рецензент Юрій ВЕРЕСОЦЬКИЙ

(ім'я та прізвище)

(підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) незарядженої допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач

(підпис)

Київ - 2024 р.

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) НМЗТЗ ім. акад. І.С. Губого

Кафедра мехатроніки та напівпровідникової техніки

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 131 Прикладна механіка  
(код і назва)

Освітньо-професійна програма Трикурс механік  
(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри М.П.Т.

Люділа КРИВОПЛЯС-Володичка

« 20 » 11 2023 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Лутякчук Артем Сергійович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження параметрів індуктора керування напівбриджем мехатронного модуля виготовленого комерційної фірми

керівник роботи Ташта Іванович Володимирівич, К.Т.Н, доц  
( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 20 » 11 2023 року № 940-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 05.01.2024р

3. Вихідні дані до роботи 1. Від дослідника - експертів та експерименталів. 2. Від обладнання - мехатронний модуль виготовлений комерційної фірми. 3. Матеріал фірми - кількість поліментиродотелет

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_

1. Вступ. 2. Вивчення стану питання, літературні осередження індукції. 3. Теоретичні експериментальні дослідження. Висновки. 5. Список літератури.

5. Перелік графічного матеріалу

Презентація на 18 аркушах



## Зміст

Реферат.....	4
Вступ.....	7
Розділ 1. Вивчення стану питання, літературний огляд джерел інформації..	9
1.1. Властивості термопластичних матеріалів та їх вплив на процес термоформування.....	9
1.2. Процес термоформування.....	17
1.3. Процес інжекційно-видувного формування.....	21
1.4.Способи нагрівання заготовок в процесах виготовлення упаковки.....	24
Розділ 2. Теоретично-експериментальні дослідження.....	52
2.1. Розрахунок показників ІЧ-випромінювання для процесу термоформування та проведення багатofакторного експерименту.....	52
2.2. Методика проведення експериментальних досліджень.....	76
2.3. Результати проведених експериментальних досліджень.....	81
2.4. Висновки експериментальних досліджень.....	102
Висновки.....	103
Список використаної літератури.....	104

## Реферат

Нагрівання матеріалу є важливим етапом у процесі створення упаковки, тому необхідним є регулювання параметрів нагрівання з метою забезпечення оптимальних значень, що дозволить надати пакуванню привабливого зовнішнього вигляду та одержати потрібні значення фізико-механічних характеристик.

В даній магістерській роботі наведено експериментальні дослідження щодо впливу параметрів інфрачервоного нагрівання, наприклад, часу нагрівання, відстані між нагрівачем та матеріалом тощо на процес формування полімерної упаковки.

На основі проведеного в процесі дослідження патентного пошуку було проаналізовано конструкції нагрівачів преформ, виявлено та усунуто недоліки. Відповідно подано 4 заявки на отримання патентів на винахід та 4 заявки на отримання патентів на корисну модель.

Пояснювальна записка складається з 132 аркушів друкованого тексту, 60 рисунків, 22 таблиць.

*Ключові слова та словосполучення:* термопластичний матеріал, аморфні і кристалічні полімери, інфрачервоне випромінювання, термоформування, інжекційно-видувне формування, температура формування, критерій рівномірності розподілу температур.

## **Abstract**

The heating of the material is an important milestone in the creation of packaging, so it is necessary to control heat settings to ensure optimal values, which will provide the packaging attractiveness and required values of physical and mechanical characteristics.

In this master's degree work there are experimental studies on the impact of parameters of infrared heating, such as heating time, distance between the heater and the material etc on the forming process of plastic packaging.

Based on the research in patent sphere were analyzed the constructions of the heaters of preforms, were identified and corrected the shortages. According to this were submitted four applications for patents for the invention and 4 applications for patents for the utility model.

Explanatory note consists of 132 pages of printed text, 60 pictures, 22 tables.

*Key words and phrases:* thermoplastic material, amorphous and crystalline polymers, infrared radiation, thermoforming, injection-blow molding, the temperature of forming, criteria uniformity of temperature distribution.

## Вступ

Всі тіла випромінюють енергію у вигляді електромагнітних хвиль. Зустрічаючи на своєму шляху непрозорий предмет, ці хвилі поглинаються і промениста енергія переходить у теплову. Інтенсивність променевипускання залежить головним чином від температури тіла. При низьких температурах (менше 100 °С) променевипускання досить невелике, але із підвищенням температури інтенсивність його збільшується пропорційно четвертій степені абсолютної температури тіла. Якщо температура перевищує 300 °С, тоді значна частина випроміненої енергії має довжину хвилі, що належить до інфрачервоного діапазону. Відповідно до закону Кірхгофа ступінь чорноти тіла дорівнює його поглинальній здібності. Числові значення ступеня чорноти матеріалів наведені в довідниках і найкраще поглинають енергію чорні тіла, а найгірше – білі.

Інфрачервоне нагрівання, на відміну від інших способів (контактне шляхом дотикання нагрітої та холодної поверхні чи конвекційне за допомогою гарячої води, пари тощо), дає змогу прогріти матеріал на всю глибину за невеликі проміжки часу, при цьому не спалюється кисень та витрати на монтаж та експлуатацію установок досить малі.

На сьогоднішній день інфрачервоні випромінювачі широко застосовуються в харчовій промисловості, зокрема при виготовленні полімерної упаковки методами термоформування та інжекційно-видувного формування. Випромінювачі різноманітні за конструкцією, розмірами та типами, тому можливо підібрати найкращий варіант для кожного процесу.

Велика кількість часу всього процесу формування припадає саме на нагрівання, отже, потрібно знати оптимальні значення параметрів для отримання гарних властивостей готового виробу.

В даній роботі проводяться дослідження плоских зразків з поліетилену, поліпропілену, полістиролу різної товщини, а також преформ з поліетилентерефталату різної місткості. Дослідження полягають у нагріванні

вище перерахованих зразків, спостеріганні за їхньою поведінкою та аналізуванні отриманих результатів з подальшим відображенням цих результатів у вигляді графіків.

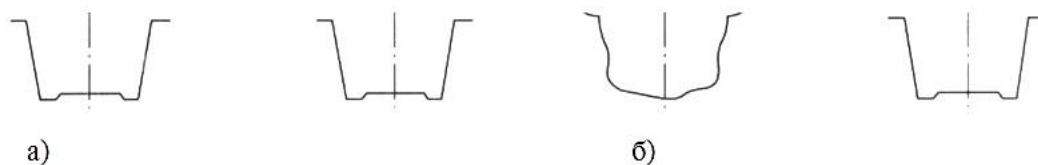
Метою роботи є оцінювання залежностей між параметрами інфрачервоного нагрівання та характеристиками дослідних зразків після проведення експериментів.

## **Розділ 1. Вивчення стану питання, літературний огляд джерел інформації.**

### **1.1. Властивості термопластичних матеріалів та їх вплив на процес термоформування.**

Прозорі термопласти є аморфними, але не всі аморфні термопласти прозорі. Аморфні термопласти (ПВХ, ПС, ПК, ПА) переробляються термоформуванням при досягненні температури скловання (температури розм'якшення). Необхідна температура залежить від марки формованого матеріалу і технологічного процесу. При вакуумному формуванні матеріал потрібно нагрівати більше, ніж при пневмоформуванні. Частково кристалічні термопласти (ПЕВЩ, ПЕНЩ, ПП, ПА, ПЕТ) ніколи не будуть абсолютно прозорими, але вони мають аморфну і кристалічну складові. Такі матеріали необхідно нагрівати вище температури розм'якшення, при цьому температура нагрівання суттєво залежить від ступеня кристалічності відповідного термопласту.

Розглянемо стаканчики, виготовлені з частково кристалічного ПП. На рис.1.1 показано вплив різних температур формування на конфігурацію виробів після термоформування та наступної стерилізації. В процесі термоформування при температурі нижче 158 °С (рис.1.1, а) кристалічні зони повністю не розплавлялися, при повторному нагріванні стакан починає деформуватися, тому що напружені кристалічні зони прагнуть відновити свою початкову форму. З іншого боку, якщо температура формування становить 163 °С (рис.1.1, б), кристаліти практично повністю розплавлялися, і матеріал став аморфним і, відповідно, конфігурація стаканчика не зміниться.



**Рис.1.1.** Вплив різних температур формування на конфігурацію виробів після термоформування.

Важливими чинниками при нагріванні термопластичних матеріалів є:

- час нагрівання;
- ступінь розширення і провисання;
- міцність формованого матеріалу в діапазоні температур формування;
- температурний градієнт по товщині матеріалу.

**Вплив часу нагрівання.** На час нагрівання заготовки впливає тип встановлених нагрівачів, товщина листа, марка полімера та його колір. Час нагрівання збільшується пропорційно товщині формованого матеріалу, оскільки пластмаси погано проводять тепло. На практиці починають з максимально можливого теплового потоку, потім поступово зменшують теплову потужність. Як функція інтенсивності теплового впливу і часу нагрівання по товщині формованого матеріалу виникає градієнт температури. Якщо після нагрівання або під час формування температура формованого матеріалу буде нижче мінімальної температури формування, то термоформування або стане неможливим, або призведе до низької якості виробу. До того ж кінцевий виріб буде мати кращі механічні властивості за умови забезпечення невеликого перепада температур у поперечному перерізі заготовки. Лист, нагрітий майже до температури розкладу, має гірші механічні властивості і розподіл товщини стінок готового виробу. Слід зауважити, що матеріал товщиною більше 2,5 мм необхідно нагрівати з обох сторін. При цьому у більшості випадків потужність верхнього нагрівача у 1,5 рази більше за потужність нижнього.

**Розширення та провисання.** Ступінь розширення пластмас є майже лінійною функцією та розраховується за допомогою коефіцієнта лінійного розширення наступним чином:

$$\Delta r = r_1 \cdot \lambda \cdot (T_2 - T_1), \quad (1.1)$$

де  $r_1$  – довжина зразка при температурі  $T_1$ ;

$\lambda$  – термічний коефіцієнт лінійного розширення;

$T_1$  – початкова температура нагрівання;

$T_2$  – кінцева температура нагрівання.

Ступінь провисання може бути розрахований спрощено (без врахування внутрішніх напружень в матеріалі):

$$f = 0.62 \sqrt{b_1 \Delta b}, \quad (1.2)$$

де  $b_1$  - ширина листа в затискній рамі машини;

$\Delta b$  - лінійне розширення листа в діапазоні температур  $T_2 - T_1$ .

При нагріванні термопластичного матеріала в термоформувальній машині в період досягнення матеріалом температури формування відбуваються наступні процеси:

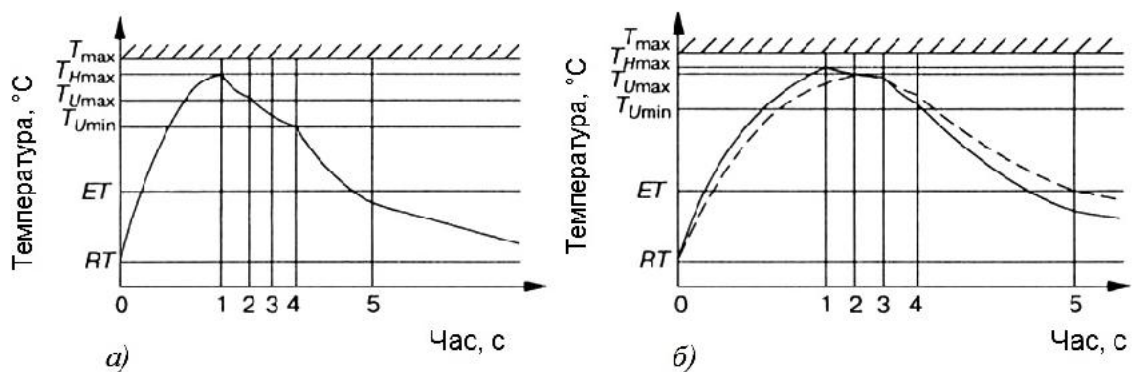
- термопластичний лист розширюється, поки не досягне температури розм'якшення;
- при нагріванні теплорадіаційними нагрівачами виникають дві проблеми. Якщо лист, що провисає, не має опори, тоді величина розширення, викликаного його власною вагою, додається до величини теплового розширення. До того ж, неможливо зробити прийнятний розрахунок ступеня провисання для матеріалів, які сильно провисають. Ще однією проблемою є ризик виникнення контакту листа з нижнім нагрівачем і неминучої поверхневої деструкції заготовки в такому випадку.

**Інтервал температур формування.** Даний інтервал визначається таким чином:

- найнижча температура є такою, при якій матеріал ще може формуватися із задовільним оформленням деталі;
- найвища температура є такою, при якій матеріал ще не починає руйнуватись (деструкція викликана перегріванням поверхні, що визначається

за зміною кольору, наявністю бульбашок та розривів на поверхні матеріалу, переходом матеріала до в'язкотекучого стану).

**Оформлення виробу.** Під оформленням виробу розуміють точність, з якою контури формуючого інструмента відтворюються на формованому виробі. Критерієм оформлення в основному є маленькі радіуси і структура поверхні матеріалу з боку, що контактує з інструментом. Чим вище температура формування, тим відповідно кращим буде оформлення виробу. Винятком є лише полімери, які починають кристалізуватися при нагріванні, типу ПЕТ. При товщині матеріалу від 4 мм і вище має бути приділено увагу достатньому прогріванню матеріала для досягнення відповідного оформлення деталей. За необхідності потрібно зменшити інтенсивність нагрівання та збільшити час нагрівання.



**Рис.1.2.** Залежність температури від часу формування виробу: а) для тонкого листа (припускається, що температура поверхні дорівнює температурі всередині листа); б) для товстого листа, у якого температура поверхні (суцільна лінія) не дорівнює температурі всередині листа (пунктирна лінія).

На рис.1.2 наведено наступні позначення та відмітки на вісі часу:  $RT$  – кімнатна температура;  $ET$  – температура розм'якшення (температура скловання  $T_g$ );  $T_u$  – температура формування;  $T_{H\max}$  – максимальна температура нагрівання листа;  $T_{\max}$  – максимальна температура, при якій відбувається руйнування структури листа;

1 – момент закінчення процесу нагрівання; 2 – операції попереднього нагрівання, витяжки тощо; 3 – момент початку формування; 4 – точка повного контакту листа з формою; 4-5 – час охолодження; 5 – момент видалення з форми.

На сьогоднішній день для виготовлення упаковки методами термоформування та інжекційно-видувного формування використовуються, в основному, такі полімери, як поліпропілен (ПП), полістирол (ПС), поліетилен (ПЕ), полівінілхлорид (ПВХ), поліетилентерефталат (ПЕТ), полікарбонат (ПК). Розглянемо дещо детальніше перераховані матеріали.

**Поліпропілен** – пластичний матеріал, що має високу міцність при ударі та багаторазовому згинанні, низьку щільність, гарні електроізоляційні властивості в широкому діапазоні температур, високу хімічну стійкість, низьку паро- та газопроникність, зносостійкість. У тонких плівках практично прозорий. Фізіологічно нешкідливий. ПП стійкий до дії кислот, лугів, розчинів солей, мінеральних і рослинних олій при високих температурах; добре змішується з фарбниками, легко кристалізується (максимальний ступінь кристалічності – 75%). Всі вироби з поліпропілену витримують кип'ятіння, і можуть стерилізуватися паром без якої-небудь зміни їх форми або механічних властивостей. Максимальна температура експлуатації поліпропілену становить 120-140 °С. Поліпропілен чутливий до дії світла і кисню, має невисоку морозостійкість.

**Полістирол** – термопластичний матеріал, що має високу твердість та гарні діелектричні властивості, високу волого- і морозостійкість, хімічно стійкий по відношенню до дії лугів і кислот, крім азотної і оцтової; стійкий до радіоактивного опромінення, але стійкість до ультрафіолетових променів невелика. Полістирол легко формується і забарвлюється, добре обробляється механічними способами, фізіологічно нешкідливий. Полістирол загального призначення досить крихкий, має низьку ударну міцність і малу теплостійкість: температура розм'якшення становить 90-95 °С.

**Поліетилен** – це термопластичний прозорий полімер з високою хімічною стійкістю. Він не ламається, має низьку газо- та паропроникність, фізіологічно нейтральний, не має запаху. ПЕ стійкий до масел, овочевих соків, алкоголю, води, бензину; руйнується азотною кислотою, газоподібним і рідким фтором і хлором. Стійкий до нагрівання у вакуумі, але руйнується на повітрі при нагріванні від 80 °С, морозостійкий (до -70 °С). Під дією ультрафіолетових променів піддається фотодеструкції. Змішування поліетилену з іншими полімерними матеріалами покращує інші його фізичні властивості. Існує чотири основних види поліетилену: поліетилен високого тиску (низької щільності) – ПВД (ПЕНЩ), поліетилен середнього тиску – ПСД, поліетилен низького тиску (високої щільності) – ПНД (ПЕВЩ), лінійний поліетилен високого тиску – ЛПВД. Детальніше розглянемо саме ПЕНЩ та ПЕВЩ.

**ПЕНЩ** – пластичний, воскоподібний матеріал. Плівка з нього міцна при розтягуванні та стисканні, має стійкість до роздирання та має достатньо низьку температуру розм'якшення (100 °С).

**ПЕВЩ** має високу міцність і невелике відносне видовження при розриванні, підвищену морозостійкість (температура скловання -150 °С), не пропускає вологу, стійкий до дії масел і жирів, не виділяє токсичні речовини в навколишнє середовище, схильний до холодотекучості (при постійному навантаженні з часом відбувається зміна розмірів). ПЕВЩ, на відміну від ПЕНЩ, має більш високу крихкість і температуру розм'якшення, але при цьому не придатний для контейнерів гарячого заповнення.

**Полівінілхлорид** – стійкий до дії вологи, кислот, лугів, розчинів солей, промислових газів, бензину, гасу, жирів, спиртів полімер, який має високу теплоутворюючу здатність. Розчиняється в дихлоретані, нітробензолі, фізіологічно нешкідливий. Жорсткі продукти на основі полівінілхлориду називаються *вініпластами*. Вініпласт - це жорсткий ПВХ, який має досить високу механічну міцність, високі показники водо- та хімістійкості, гарні діелектричні характеристики.

**Поліетилентерефталат** – тверда, безбарвна, прозора речовина в аморфному стані і непрозора (біла) в кристалічному стані. Матеріал має високу механічну міцність та ударостійкість, стійкий до багаторазових деформацій при розтягуванні і згинанні. ПЕТ відрізняється низьким коефіцієнтом тертя і низькою гігроскопічністю, розкладається під дією ультрафіолетового випромінювання. За зовнішнім виглядом листи з ПЕТ схожі на акрил і полікарбонат. ПЕТ має високу хімічну стійкість до дії кислот, лугів, солей, спиртів, парафіну, мінеральних масел, бензину, жирів, ефіру, підвищену стійкість до дії водяної пари; розчинний в ацетоні, бензолі, толуолі тощо. Листи з цього полімеру мають незначні внутрішні напруження, що робить процес термоформування простим і високотехнологічним, теплоємність листів з ПЕТ менше, ніж у полістирола і акрила, тому нагрівання ПЕТ-листів до температури формування вимагає значно менше теплової енергії і часу .

**Полікарбонат** – термопластичний полімер, що має високу жорсткість і міцність в поєднанні з дуже високою стійкістю до ударних навантажень, гарні оптичні властивості, високу теплостійкість, незначне водопоглинання, високий електричний опір. Розчиняється в метиленхлориді, дихлоретані; стійкий до дії водних розчинів мінеральних і органічних кислот, бензину, спиртів, масел, але не стійкий до дії лугів, концентрованих кислот, органічних розчинників. Крім того, деталі з високими залишковими напруженнями легко розтріскуються при дії бензину і масел. Нестійкий до впливу ультрафіолетових променів.

Таблиця 1.1.

Властивість	ПП	ПС	ПЕНЦ	ПЕВЦ	ПВХ	ПЕТ	ПК
1	2	3	4	5	6	7	8
ГОСТ	26996-86	20282-86	16337-77	16338-85	14332-78	51965-2000	17457-95
Щільність, г/см <sup>3</sup>	0,9-0,91	1,05-1,08	0,9-0,94	0,93-0,97	1,38	1,38-1,4	1,19-1,2

1	2	3	4	5	6	7	8
Температура скловання, °С	10..20	93	40	60	70	70	130-140
Температура розм'якшення по Віка, °С	140	100	75	120	80	180	150
Температура плавлення, °С	160-175	140-150	103-110	125-135	165-170	250-260	230-250
Температура розкладу, °С	300	310	320	320	170	400	330
Температура формування, °С	150-200	110-150	90-135	120-135	100-160	180-250	190-230
Коефіцієнт ліній.розширення, $10^{-5}$ °С	9	7	10	20	5,04	5,9	7
Морозостійкість, °С	-15	-40	<-100	<-70	<-30	<-60	<-100
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0,16-0,22	0,08-0,12	0,33-0,36	0,41-0,44	0,16-0,19	0,14	0,20-0,22
Питома теплоємність, Дж/(кг·К)	1,47-1,65	1,26		1,68-1,88	0,96-1,2	1,1	1,09-1,26
Стійкість до впливу тепла (1-5)	3	2	2	3	2	1-2	2
Прозорість (1-5)	2-4	3	2	2	4-5	5	5
Жорсткість (1-5)	2-3	2-3	1	2	2-3	2-3	3
Можл-сть видуву пляшок з преформ	2-4	1	1	1	2-3	5	3
Модуль пружності при розтязі, МПа	1000	3200	2600	2800	3000	2100	2200
Межа міцності на розрив, МПа	29-40	40-46	6,8-14,7	18-26	13,7-18,6	60-70	50-70

1	2	3	4	5	6	7	8
Відносне видовження при розриві, %	200-800	20	100-800	250-700	90	100	80-90
Ударна в'язкість, кДж/м <sup>2</sup>	10	14	Не ламається		29	97	84-90
Поверхневий елект. опір, Ом	1·10 <sup>15</sup> - 1·10 <sup>16</sup>	1·10 <sup>16</sup> - 1·10 <sup>17</sup>	1·10 <sup>15</sup>	1·10 <sup>14</sup>	1·10 <sup>14</sup>	1·10 <sup>14</sup>	5,1·10 <sup>15</sup>
Об'ємний елект.опір, Ом·см	1·10 <sup>16</sup> - 1·10 <sup>18</sup>	1·10 <sup>14</sup> - 1·10 <sup>16</sup>	1·10 <sup>16</sup> - 1·10 <sup>17</sup>	1·10 <sup>16</sup> - 1·10 <sup>17</sup>	1·10 <sup>15</sup>	1·10 <sup>17</sup>	1,3·10 <sup>17</sup>
Водопоглинання, %	0,01-0,03	0,2	0,02	0,03-0,04	0,1	0,3	0,2

## 1.2. Процес термоформування.

Вже в 2009р. термоформовані контейнери склали 56% від всієї кількості упаковки, яка використовувалась для ряжанки, кефіру, сметани та йогурту; 42,5% для плавленого сиру; 25% для кисломолочного сиру; 2,8% для морозива; 100% для м'яких маргаринів; 10,4% для пресервів; 12,4% для перших та других страв швидкого приготування. Для виготовлення термоформованих контейнерів застосовуються, в основному, ПС та ПП. Нинішнє співвідношення між ПС та ПП для цих цілей – 53:47%.

**Термоформування** – це спосіб виготовлення виробів з листових термопластів. Основними технологічними параметрами, які визначають перебіг процесу термоформування виробів з плоских полімерних заготовок та впливають на якість готової продукції є: температура заготовки, температура формуючого інструменту, робочий перепад тиску при формуванні, швидкість формування, швидкість охолодження відформованого виробу, властивості полімерної сировини та термодинамічні параметри

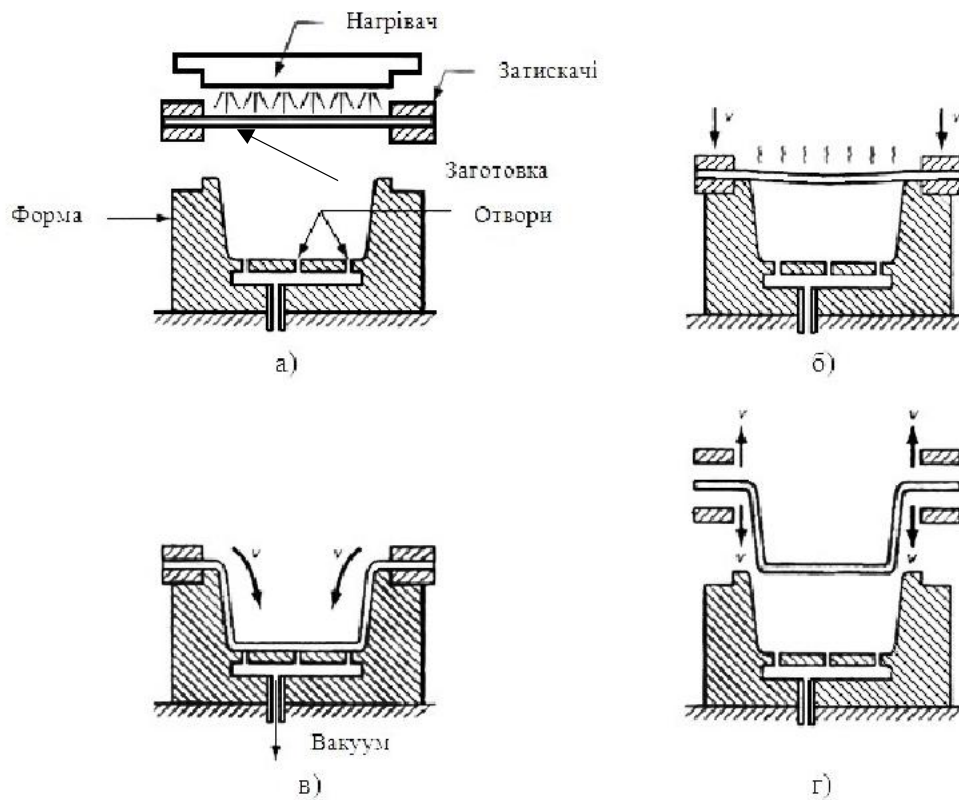
робочих середовищ та ін. Даний процес поділяється за способами створення рушійної сили відповідно на:

- механічне формування (тиск створюється формуючим пуансоном, який вдавлює розігрітий полімер у матрицю);
- вакуумне формування (відбувається під дією атмосферного тиску повітря до 0.1 МПа);
- пневмоформування (за допомогою стисненого повітря тиском до 1 МПа).

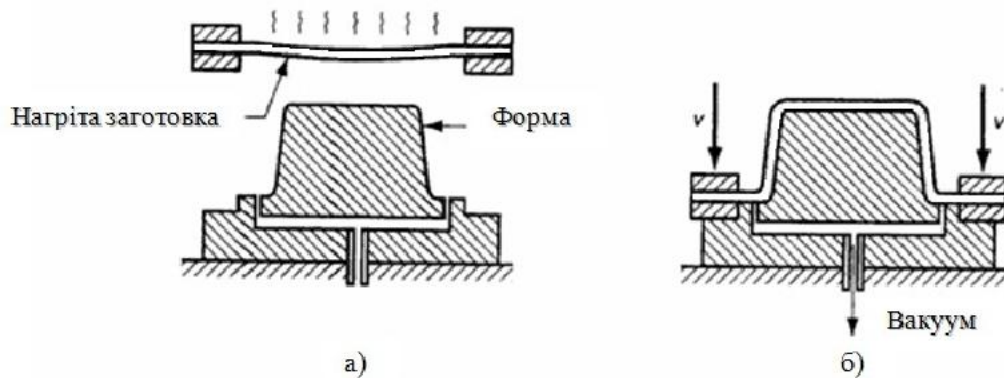
Механічне термоформування відрізняється від вакуумного та пневмоформування тим, що плоска заготовка деформується та набуває необхідної форми за рахунок витяжки металевим пуансоном.

Вакуумне та пневмоформування поділяється в свою чергу на позитивне та негативне. При позитивному формуванні (формування на пуансоні) внутрішня поверхня виробу точно відтворює форму чи малюнок формуючого інструменту. Негативне формування (формування в матриці) дає змогу отримати вироби, зовнішня поверхня яких точно відтворює форму чи малюнок внутрішньої поверхні матриці.

Розглянемо схематично процес термоформування саме на прикладі вакуумного формування (рис.1.3 та рис.1.4).



**Рис.1.3.** Схема негативного вакуумного формування: а)затискання листа; б)нагрівання заготовки; в)формування виробу; г)готовий виріб.



**Рис.1.4.**Схема позитивного вакуумного формування: а)нагрівання листа; б)формування виробу.

Процес вакуумного формування можна поділити на кілька етапів:

1.Притискання полімерної заготовки до утримувача.

2.Нагрівання заготовки до високоеластичного стану. Цей процес є досить тривалим та складає приблизно 50-80% від загального часу циклу формування виробу. Всі процеси термоформування передбачають стадію розігрівання заготовки, поверхня якої є у вільному стані, тому, аби заготовка не мала можливості занадто деформуватись під дією гравітаційних сил на цій

технологічній стадії, її розігрівання здійснюють до моменту досягнення полімером високоеластичного стану. Нагрівання заготовки до в'язкотекучого стану призводить до її досить швидкого гравітаційного витягування (провисання) і, як наслідок, до неможливості реалізації стадії формування виробу. З іншого боку, температура заготовки не повинна бути на межі склоподібного та високоеластичного станів полімера, оскільки в цьому випадку можлива неповна проформовка виробу. Таким чином, робоча температура полімерної заготовки є одним з основних технологічних параметрів, що впливають на реалізацію процесів термоформування.

На даному етапі необхідно досягти рівномірного температурного поля площини заготовки, яке забезпечить однакову величину фізичних характеристик полімеру в кожній точці заготовки. Нерівномірний опір матеріалу в різних точках заготовки призводить до нерівномірної величини деформації в цих точках. Тому виріб може бути з тонкою стінкою в кількох місцях. На рівномірність прогрівання полімерної заготовки впливає багато факторів: інтенсивний рух повітря в робочій зоні вакуумформувальної машини (ВФМ); нерівномірна товщина вихідної заготовки; неоднорідність складу полімера (виникає при вторинній переробці полімерних відходів виробництва); висока теплопровідність притискної рами, що призводить до охолодження прилеглих ділянок полімера. Для компенсації цих негативних факторів, можливості відключення нагрівання площини формовочного поля ВФМ, яка не використовується, та отримання температурного поля з заданим градієнтом температур у необхідних точках (для отримання більшого потоншення полімера в місцях, які будуть зрізані як облой) застосовують нагрівання заготовки по зонах з можливістю плавного регулювання ступеня нагрівання. Додатковою умовою досягнення рівномірності нагрівання заготовки є витримування однакової відстані між поверхнею полімеру та нагрівачами.

3. Попереднє формування. Будь-який виріб, який отримується вакуумним формуванням, за площею поверхні більший, ніж площа поверхні

заготовки. Використовуючи цю властивість можна одержати більш рівномірну товщину стінки виробу, якщо попередньо роздути нагріту заготовку до площі, яка відповідає кінцевій площі поверхні відформованого листа.

4.Безпосередньо вакуумне формування. При цьому стіл з формою підіймається у верхнє положення, лист полімера притискається до рами, з форми відкачується повітря.

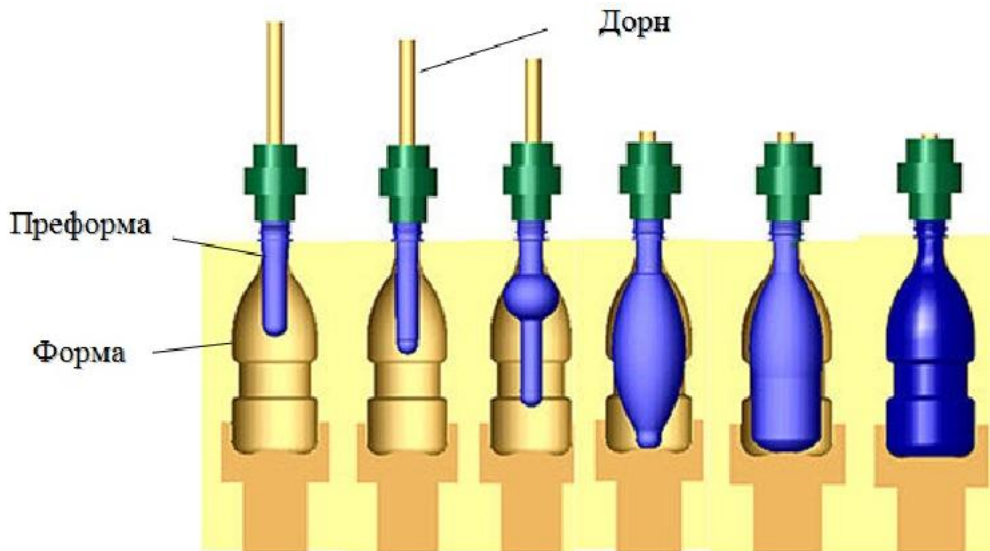
5.Охолодження виробу.

### **1.3. Процес інжекційно-видувного формування.**

Існують два різних методи видувного формування. При одностадійному процесі заготовка, яка називається *преформою*, відливається в багатопозиційній формі на термопластавтоматах, витримується до досягнення належної температури та роздувається у формі. Ця техніка найбільш ефективна для виготовлення широкогорлих банок, коли дуже висока продуктивність не є обов'язковою вимогою.

При двостадійному процесі преформи виготовляються методом лиття під тиском, зберігаються протягом короткого періоду часу (зазвичай від 1 до 4 днів) і потім роздуваються у підігрівально-роздувній машині. Розділення стадій формування заготовки та її роздування дозволяє досягти високої продуктивності при виготовленні як заготовок, так і готових виробів. Через відносно високу вартість обладнання для лиття під тиском та підігрівально-роздувних машин, ця технологія найкраще підходить для виготовлення пляшок для фасування газованих напоїв.

Детальніше можна розглянути двостадійний процес (рис.1.5).



**Рис.1.5.** Схема процесу інжекційно-видувного формування.

ПЕТ-преформи подаються насипом в бункер завантажувального пристрою і транспортуються в піч тунельного типу, де нагріваються до робочої температури. Піч тунельного типу складається з кількох нагрівальних модулів, в яких передбачено певну кількість індивідуально регульованих зон нагрівання (переважно з інфрачервоних випромінювачів, тому що вони дають швидке і глибоке прогрівання преформ). При нагріванні поєднується пряме і відбите теплове випромінювання, що істотно заощаджує витрати електроенергії. Спосіб переміщення преформ всередині печі може бути різний, наприклад, преформа розташовується між роликami і обертається за рахунок притискання роликів до прогумованої планки, а роликi розташовуються на ланцюгу, що надає поступального руху преформам по тунелю. В результаті проведених наукових досліджень було розроблено інші можливі конструктивні виконання пристроїв транспортування преформ, які наведено у додатках.

Система управління процесом підтримує в автоматичному режимі задану температуру преформи, вимірюючи температуру в кожній із зон нагрівання. Вентиляційна система і водяний контур охолодження в притискній рейці забезпечують охолодження горловини преформи, причому теплові екрани не дозволяють різьбовій частині нагріватися.

Наступне переміщення преформ в прес-форму здійснюється за

допомогою маніпулятора. Після змикання прес-форми спрацьовує система замкового затвору (привод від пневмоциліндра), яка дозволяє підтримувати щільний контакт між обома половинками прес-форми і гарантує відмінну якість площини стикування. Зазвичай під час роздування заготовка додатково розтягується стрижнем. Роздування заготовки спочатку має «вільний» характер – зміна товщини відбувається досить рівномірно і преформа має форму «бульбашки». Потім заготовка розширюється, притискається до форми і охолоджується. На якість виробу на цій стадії процесу формування суттєво впливають тиск повітря і температура заготовки. Стадія охолодження починається з моменту контакта заготовки з поверхнею охолоджуваної форми і закінчується після охолодження найбільш товстих ділянок виробу, що примикають до горловини або денця. Передчасне виймання виробів супроводжується розм'якшенням сусідніх з горловиною ділянок та їх незворотним деформуванням.

В інжекційно-видувному формуванні обов'язково присутня система контролю перегрівання печі, наприклад, термоконтролер на максимальну температуру в камері, при перевищенні якої спрацьовують витяжні вентилятори.

Виготовлення порожнистих виробів роздуванням дозволяє зменшити товщину їх стінки, виготовляти вироби складної форми; скорочується витрата полімерного матеріалу внаслідок відсутності прес-кантів і припливів, збільшується міцність і покращується зовнішній вигляд продукції, інструмент має низьку вартість.

Недоліками виробів, виготовлених цим методом, є те, що всі вироби мають здатність необоротно втрачати свою форму при підвищенні температури вище температури розм'якшення, що накладає обмеження на температурний інтервал їх експлуатації. Крім того, товщину стінки важко контролювати.

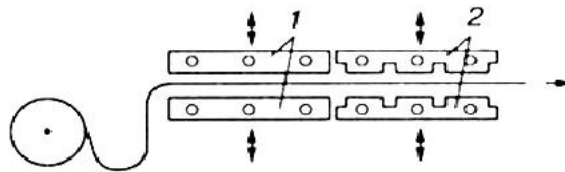
## 1.4.Способи нагрівання заготовок в процесах виготовлення упаковки.

На сьогоднішній день в інжекційно-видувному процесі найчастіше застосовують інфрачервоні випромінювачі. В той же час на термоформувальних установках застосовують кілька методів нагрівання термопластів:

- контактний;
- конвекційний;
- теплорадіаційний.

При контактній або конвекційній теплопередачі енергія проводиться матеріалом, тоді як радіаційне тепло передається електромагнітними хвилями.

**Контактне нагрівання.** Контактні нагрівачі передають тепло до листа або рулонів шляхом контакту за рахунок теплопровідності (рис.1.6).



**Рис.1.6.** Двостороннє контактне нагрівання (1 - нагрівальні плити для контактного нагріву всій поверхні; 2 – контактні нагрівальні плити).

Перевагами контактного нагрівання є:

- можливість точного контролю температури формованого матеріалу;
- матеріал не може бути перегрітий при правильному становленні температури, якщо температура нагрівання ідентична температурі формування;
- існує можливість вибіркового нагрівання, тобто можна нагріти тільки ті поверхні, які будуть формуватися на станції формування;

- при відповідному екрануванні втрати тепла можуть бути дуже низькими;

До недоліків контактного нагрівання можна віднести такі параметри:

- при досягненні температури нагрівальної плити вище, ніж температура формування, матеріали мають тенденцію прилипати до поверхні контакту (контактні нагрівачі, вкриті антиадгезійними речовинами, зменшують цю властивість);

- для передачі тепла необхідно встановлювати рівномірний контакт по всій поверхні матеріалу, який піддається термоформуванню. Так як полімери розширюються при нагріванні, можлива поява плям на поверхні матеріалу через деформування, викликана високим коефіцієнтом температурного розширення.

**Конвекційне нагрівання.** Під конвекційним нагріванням розуміють передачу тепла за допомогою гарячого повітря, пари, гарячої води і т. ін.

При конвекційному нагріванні рівність температури, що досягається на поверхні та всередині матеріалу, залежить від часу нагрівання. Висока рівномірність розподілу температури може бути досягнута тільки при тривалому часі нагрівання.

**Теплорадіаційне нагрівання.** Тепло в даному випадку передається в інфрачервоному спектрі. Інфрачервоне випромінювання – це електромагнітне випромінювання, що займає спектральний діапазон між червоною межею видимого світла (з довжиною хвилі  $\lambda = 0,74$  мкм) і мікрохвильовим випромінюванням ( $\lambda \sim 1-2$  мм). Зараз весь діапазон інфрачервоного випромінювання поділяють на три складових: короткохвильова зона,  $\lambda = 0,74-2,5$  мкм; середньохвильова зона,  $\lambda = 2,5-50$  мкм; довгохвильова зона,  $\lambda = 50-2000$  мкм.

Інфрачервоне випромінювання також називають «теповим», так як воно сприймається шкірою людини як відчуття тепла. При цьому довжини хвиль, що випромінюються об'єктом, залежать від температури нагрівання: чим вище температура, тим коротше довжина хвилі і вище інтенсивність

випромінювання. Спектр випромінювання абсолютно чорного тіла при відносно невисоких (до декількох тисяч кельвінів) температурах лежить в основному саме в цьому діапазоні.

До особливостей інфрачервоного випромінювання слід віднести наступне:

1. При нагріванні однорідних матеріалів інфрачервоними променями, що відповідають за довжиною хвилі максимуму поглинальної здатності матеріалів, досягається досить висока інтенсивність нагрівання з високим енергетичним ККД. При температурі випромінювачів більше 800 К інфрачервоні промені передають значно більші потужності порівняно з конвективним та контактним нагріванням. Це пояснюється тим, що при конвективному та контактному нагріванні передана потужність (Вт) залежить від температури нагрівача (різниці температур нагрівача та матеріала, який нагрівається) у першій степені за законом Фур'є відповідно до формули (1.3), а при інфрачервоному нагріванні – в четвертій степені за формулою (1.4).

$$P = \frac{\lambda}{\delta} (T - T_0) F, \quad (1.3)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріала, Вт/(м·К);

$\delta$  – товщина матеріала, м;

$T$  – температура нагрівача, К;

$T_0$  – температура зовнішньої поверхні матеріала, який нагрівається, К;

$F$  – поверхня теплопередачі (активна поверхня нагрівача), м<sup>2</sup>.

$$P = \bar{G} M (T_1^4 - T_2^4) F_{12}, \quad (1.4)$$

де  $\bar{G}$  – стала Стефана-Больцмана,  $\bar{G} = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);

$M$  – коефіцієнт променевипускання,

$T_1$  і  $T_2$  – температури відповідно нагріваючої та нагріваної поверхні, К;

$F_{12}$  – спільна поверхня випромінювання, м<sup>2</sup>.

$$F_{12} = \varphi_{12} F_1 = \varphi_{21} F_2, \quad (1.5)$$

де  $F_1, F_2$  – поверхні тіл, які беруть участь у теплообміні;

$\varphi_{12}, \varphi_{21}$  – середні по поверхні коефіцієнти опромінення тіл, які показують, яка частина теплового потоку від випромінювача потрапляє на опромінюване тіло.

2. Інфрачервоне нагрівання має вибірковий тепловий вплив. Підбираючи спектр випромінювання, який відповідає оптимальним оптичним властивостям окремих складових неоднорідного за складом матеріала, можна здійснювати їх селективне нагрівання.

3. Інфрачервоні промені, подібно до інших електромагнітних коливань, поширюються у матеріалі на глибину їх проникнення зі швидкістю світла. Відповідно нагрівання матеріалів відбувається зразу на повну глибину проникнення на відміну від послідовного нагрівання кожного шару при інших способах теплопередачі.

Важливими характеристиками такого випромінювання є нижче перераховані показники. Повна кількість енергії, що випромінюється за одиницю часу одиницею випромінюючої поверхні називають *випромінюючою здатністю* ІЧ-випромінювача  $E$ , Вт / м<sup>2</sup>. Енергія випромінювання залежить від довжини хвилі  $\lambda$  і температури випромінюючої поверхні і є інтегральною характеристикою, оскільки враховує енергію випромінювання хвиль всіх довжин. Випромінюючу здатність, віднесenu до інтервалу довжин хвиль  $d\lambda$ , називають *інтенсивністю випромінювання*:

$$I = \frac{dE}{d\lambda}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{мкм)}. \quad (1.6)$$

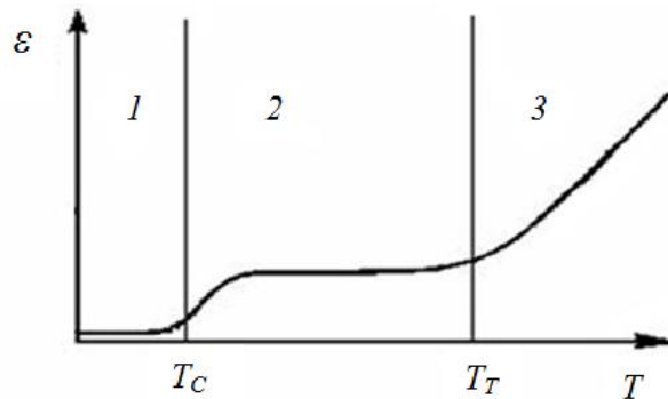
Інтегрування попереднього виразу дозволяє визначити випромінюючу здатність виходячи з визначеного експериментальним шляхом спектру інтенсивності випромінювання в діапазоні довжин хвиль від  $\lambda_1$  до  $\lambda_2$ :

$$E = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} I d\lambda. \quad (1.7)$$

Відомо, що в міру підвищення температури нагрівача велика частина енергії буде припадати на частку високочастотних випромінювань, які гірше поглинаються листом. Це означає, що електроенергія, яка підводиться до нагрівачів, менш ефективно використовується при роботі на високих

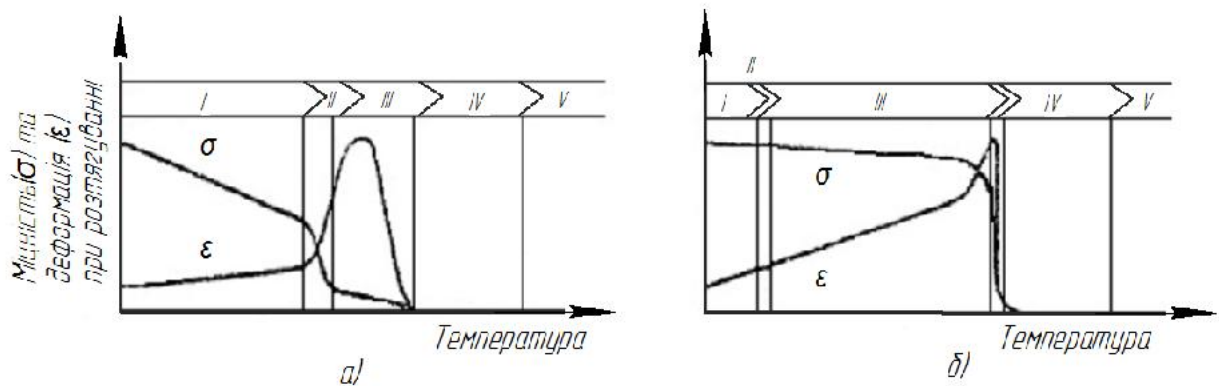


В загальному випадку термомеханічна крива для полімерів виглядає як на рис.1.8.



**Рис.1.8.** Діаграма залежності деформації полімера від температури:  $T_c$  – температура скловання;  $T_t$  – температура текучості; 1, 2, 3 – області склоподібного, високоеластичного та в'язкотекучого станів полімеру.

У всіх термопластів міцність та деформація при розтягуванні з однаковим навантаженням залежать від температури. Для аморфних та частково кристалічних полімерів ця залежність неоднакова (рис.1.9).



**Рис.1.9.** Залежність міцності та деформації при розтязі від температури для аморфних (а) та частково кристалічних (б) термопластів: I – твердий крихкий стан; II – затвердіння; III – високоеластичний стан; IV – в'язка течія; V – термічне розкладання; VI – твердий еластичний стан; VII – руйнування кристалів.

Для формування листових термопластів найбільш цікавою є область високоеластичного стану у аморфних матеріалів та область руйнування

кристалів у частково кристалічних, так як саме в цій області частково кристалічні термопласти проявляють високоеластичні властивості: вони більше деформуються і деформація оборотна за тривалий відрізок часу.

Міцність при розтягуванні в зазначених областях значно менше, ніж у твердому стані, а деформація розтягування проходить через максимум і у багато разів перевищує деформацію того ж матеріалу у твердому стані. Завдяки цьому в температурному діапазоні, що забезпечує високоеластичні властивості термопласта, є такий інтервал температур, в якому міцність при розтягуванні настільки невелика, а деформація розтягування настільки велика, що стає можливим досягання великої глибини витяжки при відносно невеликому зусиллі формування.

Фізично високоеластичні властивості термопластів пояснюються наявністю мікроброунівського руху макромолекул полімера, а саме, обертанням сегментів макромолекул навколо їхніх головних валентних осей. При цьому сили міжмолекулярної взаємодії завдяки тепловим коливанням значно послаблені.

Отже, температура нагрівання листової заготовки при термоформуванні повинна відповідати високоеластичному стану перероблюваного матеріала. Правильний вибір цієї температури всередині зони на термомеханічній кривій даного матеріалу, дозволяє в певних межах регулювати механічні властивості і різновісність формованого виробу.

Особливу увагу слід приділяти процесу нагрівання заготовок з частково кристалічних матеріалів. При нагріванні до необхідної температури формування ці матеріали змінюють свою структуру. Температура термоформування повинна приблизно відповідати температурі плавлення кристаліта і витримуватися по можливості точно. Поліетілені різної щільності потребують різної кількості теплоти. Чим вище щільність поліетілену, тим більше теплоти потрібно для нагрівання його до необхідної температури. Значна кількість теплоти при цьому витрачається на плавлення кристалів. Звідси випливає, що для нагрівання заготовок з ПЕВЩ потрібно

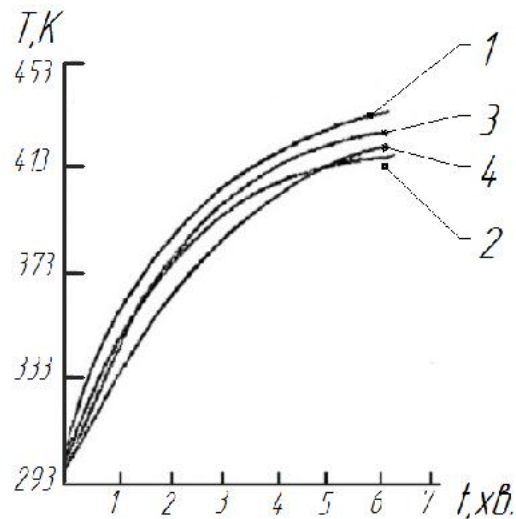
більше часу, ніж для заготовок з ПЕНЩ. Залежність температури плавлення кристалітів від щільності поліетилену має прямопропорційний характер.

Час нагрівання термопласту зростає із збільшенням його питомої теплоємності і товщини листа і зменшується зі збільшенням коефіцієнта теплопровідності і граничного коефіцієнта теплопередачі.

Значні труднощі у контролюванні температури заготовки виникають через малу теплопровідність термопластів, теплова радіація ІЧ-випромінювачів та неможливість вимірювання температури у внутрішніх шарах матеріалу. Найбільш розповсюдженим є метод контролю температури заготовки за часом нагрівання. При цьому проводиться формування кількох дослідних заготовок, кожна з яких формується при різному часі нагрівання. Відформовані вироби перевіряються на повноту оформлення, зовнішній вигляд та механічні властивості. За оптимальним співвідношенням цих параметрів визначають найкращий зразок та час його нагрівання беруть за основу для виготовлення наступних виробів.

Цей метод виправдовує себе при нагріванні термопласта у нагрівачах камерного типу та при контактному нагріванні. При роботі з ІЧ-випромінювачами відкритого типу одержуються більш-менш точні результати лише при дотриманні кількох вимог: по-перше, від циклу до циклу повинні залишатись незмінними режим роботи теплорадіаційного нагрівача та його розташування відносно заготовки; по-друге, необхідно забезпечити повну відсутність у просторі між нагрівачем та заготовкою сторонніх потоків повітря.

В деяких випадках при застосуванні даного методу контролю температури встановлюють залежність температури заготовки від часу нагрівання (рис.1.10). Залежності такого типу дійсні лише для матеріалів одної марки, кольору, товщини та конкретної нагрівальної системи, яка працює в постійному режимі.



**Рис.1.10.**Залежність температури листової заготовки ( $\delta=5$  мм) від часу її нагрівання: 1-целюлоїд, 2-ПП, 3-ПВХ, 4-УПС.

Застосовують для контролю температури також і вимірювальні пристрої. Способи вимірювання температури за допомогою таких пристроїв поділяються на контактні та безконтактні. До контактних методів відноситься використання різних термопар, чутливий елемент яких дотикається до поверхні заготовки. Безконтактні методи вимірювання температури базуються на використанні різних пірометрів.

У загальному випадку нагрівання заготовок відбувається таким чином, щоб температура по всіх точках їх поверхонь в будь-який момент часу була однаковою. Нерівномірне нагрівання може призвести до утворення в матеріалі внутрішніх напружень, нерівномірної витяжки термопласту і утворення на виробі складок і зморщок; крім того, можливе виникнення окремих перегрітих зон заготовки.

Через малу теплопровідність термопластів поверхня заготовки, звернена до нагрівача (при нагріванні термопласту теплорадіаційним методом), або до поверхні, що омивається тепловим агентом, наприклад гарячим повітрям (при нагріванні в термокамерах), розігрівається набагато швидше, ніж внутрішні шари матеріалу. В результаті цього на поверхні заготовки можлива термічна деструкція термопласту, в той час як внутрішні шари матеріалу не встигають перейти із склоподібного стану у

високоеластичний. Збільшення інтенсивності нагрівання в цьому випадку не дає позитивних результатів, так як поверхнева термодеструкція термопласту лише активізується. У зв'язку із розглянутим інтенсивність нагрівання термопласту при вакуумному і пневматичному формуванні не перевищує звичайно 15-20 кВт/м<sup>2</sup>.

Заготовки товщиною 0,025...1 мм можуть бути розігріті протягом декількох секунд за допомогою ІЧ-випромінювачів, розташованих на відстані 75-100 мм від поверхні аркуша.

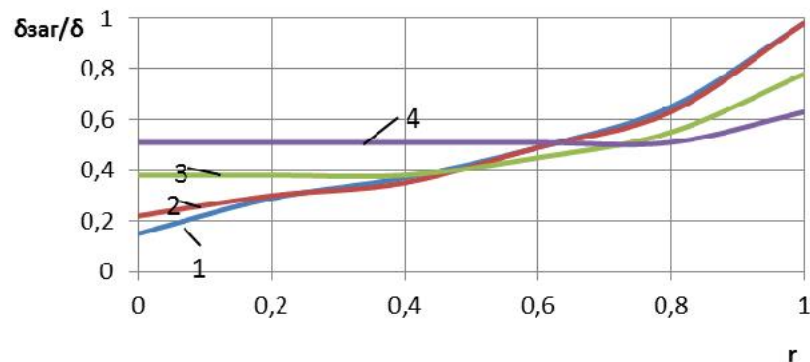
При нагріванні необхідно мати на увазі, що кінцеві температури заготовки до моменту формування повинні відповідати таким умовам:

1. Температура зовнішньої, зверненої до нагрівача, сторони заготовки повинна бути менше або дорівнювати максимально допустимій температурі формування даного термопласту (зазвичай ця температура відповідає температурі течії на термомеханічній кривій або температурі початку термодеструкції);

2. Температура внутрішньої поверхні листа при односторонньому або середнього шару при двосторонньому нагріванні повинна бути рівна або більше мінімально допустимої температури формування даного термопласту.

Вплив температури нагрівання листової заготовки на різновтовщинність стінок готового виробу невелика. Такий вплив присутній лише в тому випадку, якщо при нагріванні заготовки температура затискного пристрою значно підвищилась і термопласт отримав можливість витягуватись з-під затискачів. Однак на різновтовщинність виробів можна в значній мірі впливати, створюючи нерівномірне температурне поле при нагріванні заготовки. На рис.1.11 наведені графіки зміни відношення товщини заготовки  $\delta_{\text{заг}}$  до товщини  $\delta$  напівсферичного виробу по радіальній координаті  $r$  залежно від умов нагрівання заготовки. Крива 1 отримана при рівномірному розподілі потужності по випромінюючій поверхні нагрівача (треба мати на увазі, що в цьому випадку температурне поле нагрівача є нерівномірним через істотні втрати теплоти по периметру нагрівача). Крива 2

отримана при рівномірному температурному полі на нагрівачі (теплові втрати компенсуються збільшенням потужності периферійних елементів нагрівача). Крива 3 отримана при рівномірному температурному полі на заготовці і, нарешті, крива 4 - при температурному полі заготовки з температурним градієнтом, що зростає від центру до краю. Як видно з рис.1.11, останній варіант нагрівання заготовки забезпечує при негативному способі формування найкращий розподіл товщини стінки виробу.

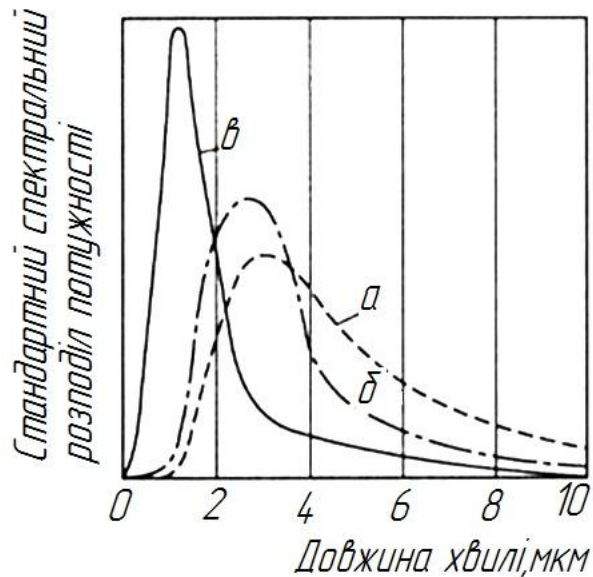


**Рис.1.11.** Залежність зміни  $\delta_{\text{заг}} / \delta$  по координаті  $r$  залежно від умов нагрівання заготовки.

Кожен вид матеріалу (тип, колір і т. ін.) має свою власну криву поглинання. Якщо на невеликій глибині, наприклад, 20 мкм, визначений вид полімеру має ступінь поглинання 100% для даної довжини хвилі, то це означає, що товстим аркушем промені повністю поглинаються вже на його поверхні. Не існує тіла (в даному випадку нагрівального елемента), яке випускає промені тільки однієї довжини хвилі, навіть якщо його поверхня має однорідну температуру. Всі випромінюючі тіла перекривають майже весь інфрачервоний діапазон. Промені певної довжини хвилі в цьому випадку тільки нагрівають поверхню, інші проникають на різну глибину, в той час як треті все знову і знову відбиваються або вільно проходять через матеріал, не нагріваючи його.

Відмінність між моделями нагрівальних елементів полягає в розподілі випромінюючої здібності в інтервалі різних довжин хвиль. Температура нагрівальних елементів визначає максимальну потужність, передану

матеріалу. Якщо б три нагрівальних елемента, показаних на рис.1.12, мали однакову потужність, то три області нижче кривих *a*, *б*, *в* були б ідентичні.



**Рис.1.12.** Принципова схема розподілу потужності нагрівальних елементів: а) керамічний нагрівач, 700 °С; б) синтетичний кремнієвий нагрівач, 950 °С; в) галогеновий нагрівач, 2000 °С.

Передана кількість тепла залежить від наступних факторів:

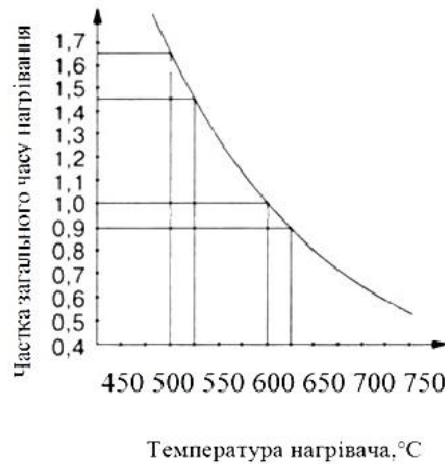
- Кількість тепла збільшується в четвертому ступені в залежності від температури нагрівального елемента, максимальна температура нагрівача залежить від його потужності і конструкції. Наприклад, використання нагрівачів з плоскою випромінюючою поверхнею дозволяє збільшити температуру поверхні нагрівача та зменшити загальний час нагрівання порівняно з нагрівачами із сферичною випромінюючою поверхнею. Чим вище температура нагрівального елемента, тим коротше період нагрівання (рис. 1.13).

- Чим менше відстань між блоком нагрівачів і матеріалом, тим більше передана кількість тепла. Чим більше відстань між нагрівальним елементом і матеріалом, тим триваліший час нагрівання (рис.1.14).

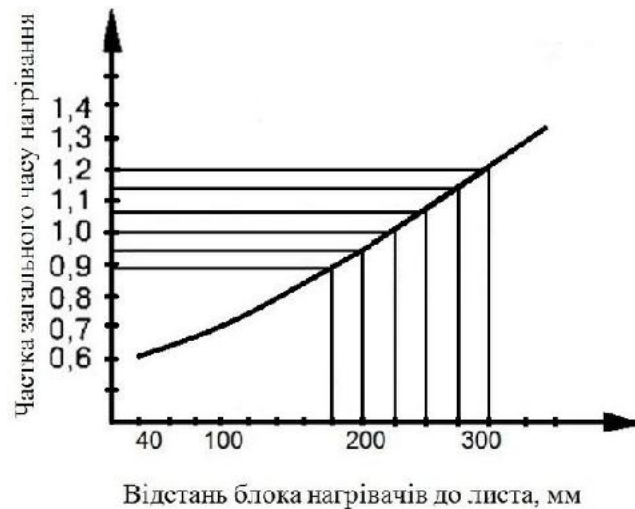
- Передана кількість тепла і стабільність системи нагрівання збільшуються

при рівномірному випромінюванні по всій площі блоку нагрівачів.

- Випромінююча поверхня нагрівача повинна складатися з матеріалу, що має високий коефіцієнт випромінювання.
- Передана кількість тепла залежить від коефіцієнта відбивання (ступеня чорноти) матеріалу.



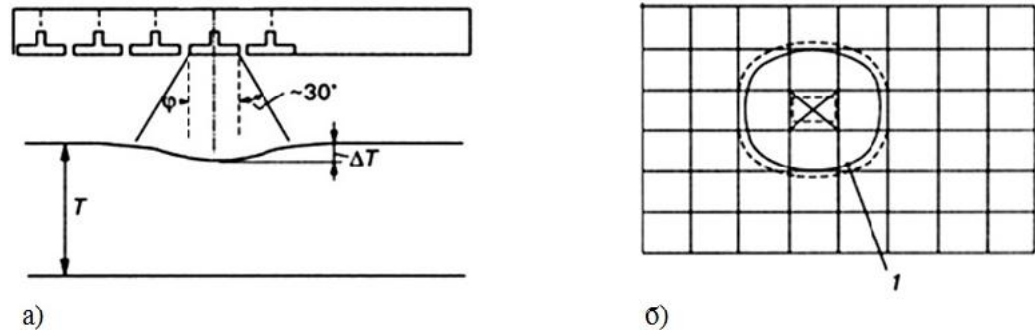
**Рис.1.13.** Зміна часу нагрівання як функція температури нагрівального елемента для керамічних нагрівачів (час наведено в умовних частках, за одиницю прийнято час при відстані 200 мм та температурі нагрівачів 600 °C).



**Рис.1.14.** Зміна часу нагрівання як функція відстані від нагрівального елемента до матеріалу (час нагрівання наведено в умовних частках; за одиницю прийнято час при відстані 200 мм).

Розмір області, що обслуговується індивідуальним нагрівачем, також має першочергове значення. Нагрівач не тільки направляє свої промені на область нижче нього, але і у всіх напрямках, подібно до лампочки без відбивача. Промені не концентруються. Тому важливим є застосування

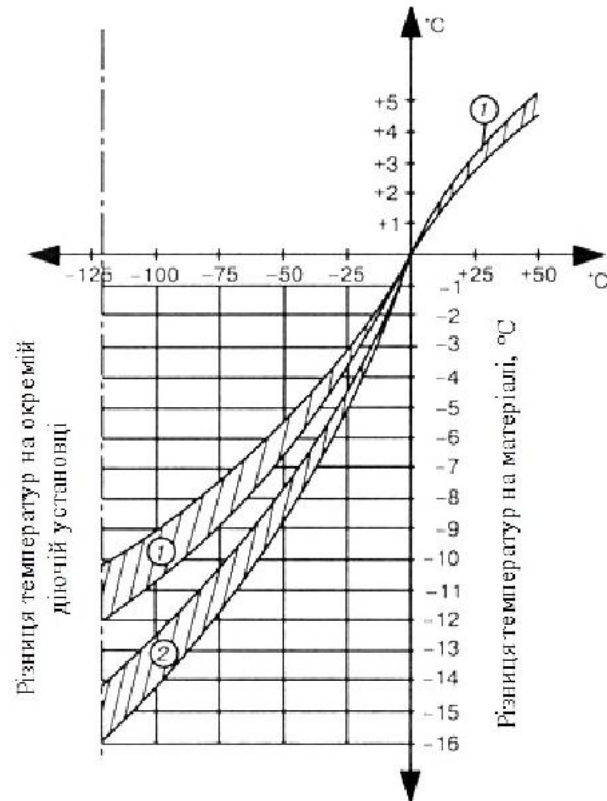
екранування в якості межі розподілу областей, які нагріваються. Найбільший ефект проявляється в зоні безпосередньо під нагрівальним елементом (рис.1.15). Різниця температур на поверхні матеріалу досягає максимуму під центральною частиною відключеного «холодного» елемента, зменшуючись при виході за його межі. Практично дія припиняється за межами кута близько  $30^\circ$ .



**Рис.1.15.** Вплив нагрівача на розмір зони, яка ним нагрівається: а)вид збоку, б)вид зверху.

Умовні позначення на рис.1.15 наступні: 1 – фактична зона впливу;  $\varphi$  – кут випромінювання;  $T$  – температура матеріалу;  $\Delta T$  – досягнена різниця температур в матеріалі.

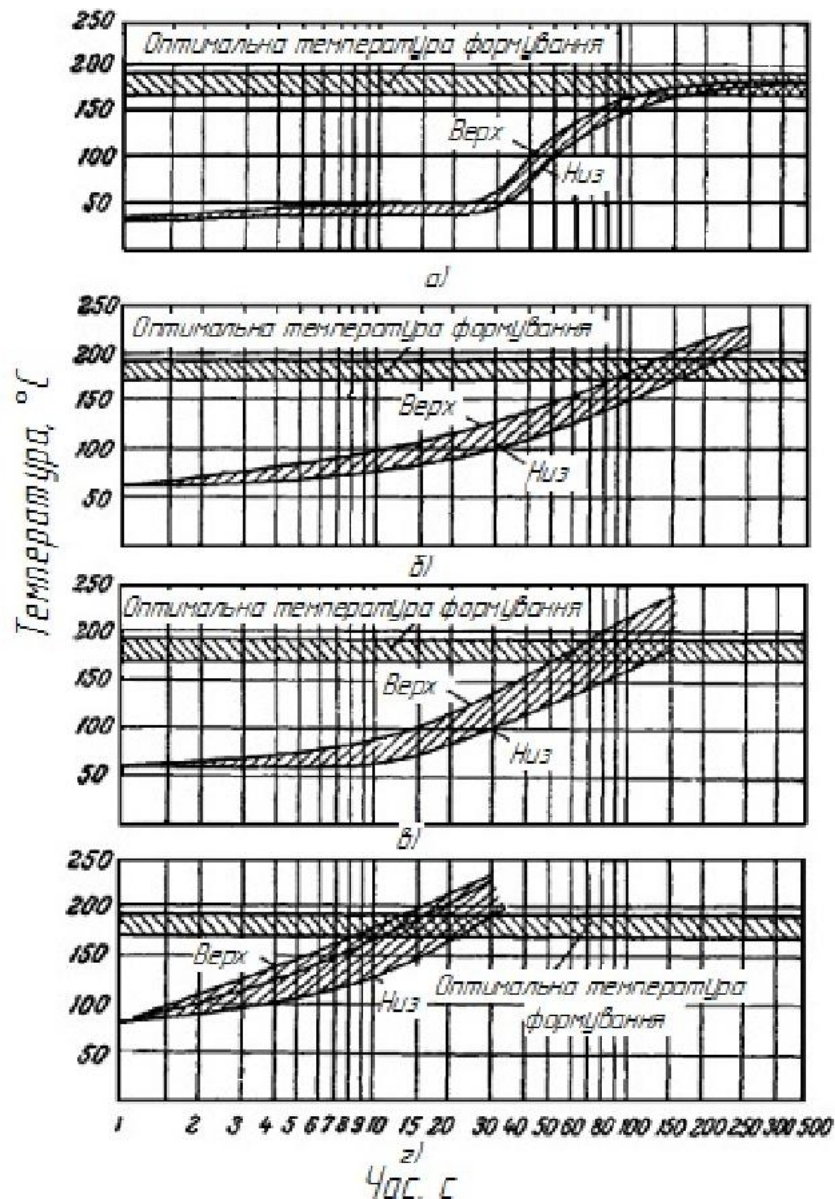
Часто постає питання вибору розмірів нагрівача для оптимального процесу нагрівання. Типові розміри керамічних і синтетичних кремнієвих нагрівальних елементів - 62x62 мм, 125x62 мм, 125x125 мм (тільки керамічний) і 250x62 мм. Довгі, вузькі нагрівачі не підходять для однопозиційних машин. Для автоматичних рулонних термоформерів, в яких матеріал проходить під нагрівачами кілька разів, довжина нагрівачів у напрямку транспортування фактично є несуттєвою. Однак перпендикулярно до напрямку подачі, принаймні, дві зовнішні і одна центральна температурні зони повинні бути регульованими. Для автоматичних машин з рулонною подачею цілком достатньою є ширина нагрівача поперек напрямку подачі 62 мм, а для великих машин - 125 мм.



**Рис.1.16.** Досягнена різниця температур  $\Delta T$  в матеріалі під нагрівальним елементом зі змінною температурою, отримана на листі з ударостійкого полістиролу (товщина матеріалу  $\delta=5$  мм; температура матеріалу  $160$  °C; розмір нагрівача  $125 \times 62$  мм; температура верхнього нагрівача  $600$  °C; температура нижнього нагрівача  $450$  °C).

На рис.1.16 заштриховано відповідно зони: 1 - знижена температура нагрівача в центрі верхньої нагрівальної панелі; 2 – знижена температура нагрівача в центрі верхньої та нижньої нагрівальних панелей.

Розподіл температур на верхній та нижній поверхні листа білого УПС товщиною  $2$  мм при нагріванні різними випромінювачами показано на рис.1.17.

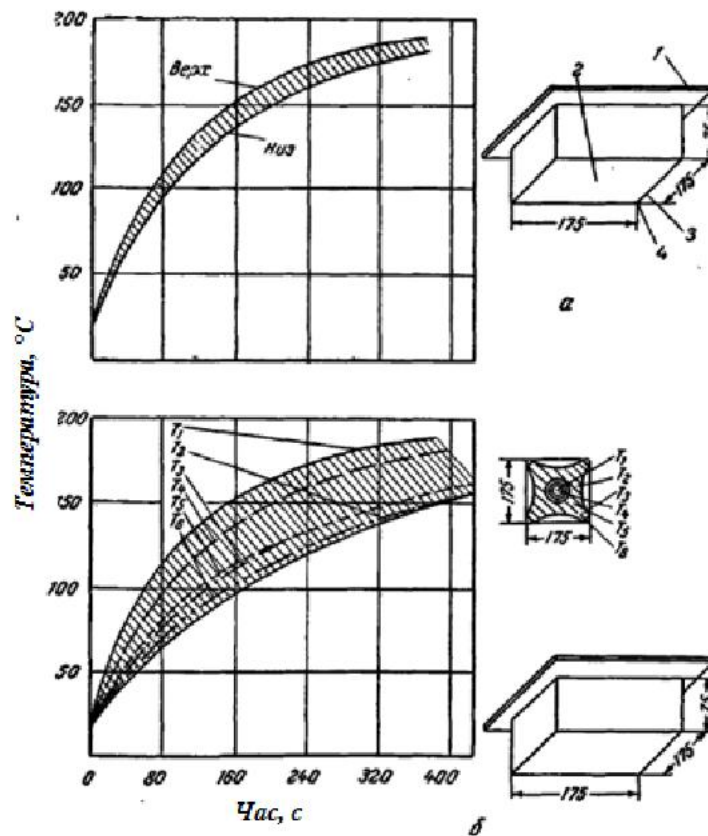


**Рис.1.17.** Розподіл температур при нагріванні листа з УПС товщиною 2 мм ІЧ-випромінювачами: а) нагрівач із скла «пірекс», відстань до листа 200 мм; б) нагрівач з ізоляцією і з скловолокна, робоча температура нагрівача 370 °С, відстань до листа 115 мм; в) стрічковий ніхромовий нагрівач, робоча температура нагрівача 370 °С, відстань до листа 90 мм; г) стрічковий ніхромовий нагрівач, робоча температура нагрівача 540 °С, відстань до листа 90 мм.

При нагріванні листа ділянки, які піддаються надмірному видовженню при формуванні можна затінути під час нагрівання. Наприклад, результати такого нагрівання для білого УПС товщиною 2 мм, накритого кількома шарами тонкого паперу наведено на рис.1.18. Перепад температур на

поверхні листа складав майже  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при нагріванні без екранування максимально можливі перепади досягали лише  $6\text{-}7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Коливання товщини стінок виробу з листа, нагрітого з екрануванням, складало  $0,05\text{ мм}$ , а для листа, нагрітого звичайним способом –  $0,68\text{ мм}$ .

Відповідно до стандартних методів (ASTM D648) можна визначити теплостійкість та температуру розм'якшення різних термопластів. Температура розм'якшення замірялась за величиною провисання листа при нагріванні. Випробування на провисання проводиться тільки для жорстких листів. Зразок термопластичного матеріалу розмірами  $12,7\times 25,4\text{ мм}$  консольно закріплюється на штативі та розміщується в печі, швидкість нагрівання складає  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  за хвилину. Температура, за якої провисання зразка дорівнює  $3,175\text{ мм}$ , вважається температурою розм'якшення.



**Рис.1.18.** Вплив розподілу температур на рівномірність товщини стінок виробу: а) без екранування, товщина стінок нерівномірна (1 – борт  $2,08\text{ мм}$ , 2 – в центрі  $0,76\text{ мм}$ ); б) з екрануванням (екран з 4 шарів паперу), рівномірність товщини виробу в межах  $0,58\text{-}0,63\text{ мм}$  досягається нерівномірним

нагріванням (Т1 – центр верхньої сторони, Т2 – верхня сторона, Т3 – кут верхньої сторони, Т4 – центр нижньої сторони, Т5 – нижня сторона, Т6 – кут нижньої сторони).

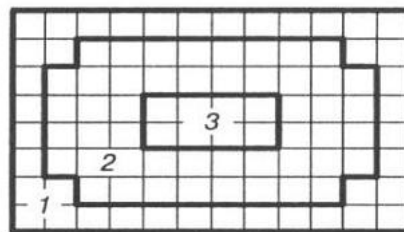
Як ідеальний варіант, на рис.1.19,а зображено рівномірне нагрівання системи необмеженого розміру при нульовій висоті рами. На рис.1.19,б показано випадок при затисканні заготовки рамою. За допомогою наступних рекомендацій можна практично наблизитися до ідеального варіанту:

- покрити раму алюмінієвими відбивачами або напиленням алюмінію при вмісті алюмінію 99,5%;
- тепловідбивачі і відбивач рами повинні бути вертикальними і однаковими скрізь по висоті; для алюмінієвої рами відбивачі не потрібні;
- вибрати висоту відбивача для системи нагрівачів таким чином, щоб зазор по вертикалі був якомога меншим.



**Рис.1.19.** Використання нагрівачів в крайніх зонах: а) як ідеальний випадок;б) реальні умови при нагріванні матеріалу із затискної рамою.

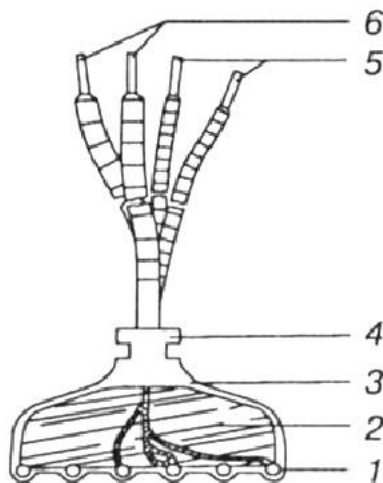
Крайні ряди нагрівачів втрачають більше тепла, тому вони використовують більше енергії, ніж нагрівачі, розташовані в центрі блоку (рис.1.20).



**Рис.1.20.** Різні температурні зони у блоці нагрівачів для рівномірно нагріваного матеріалу в однопозиційній машині: 1 – температурна зона з

температурою нагрівача  $T_1$ , 2 – температурна зона з температурою нагрівача  $T_2$ , 3 – температурна зона з температурою нагрівача  $T_3$  ( $T_1 > T_2 > T_3$ ).

Теплорадіаційні нагрівачі поділяються на кілька типів. На рис.1.21 показано керамічний нагрівач. Нагрівальні спіралі 1 закладені в керамічний матеріал 3. Високотемпературна ізоляція 2 зменшує поточне споживання енергії приблизно на 18% у порівнянні зі стандартними керамічними нагрівачами, оскільки на звороті втрачається менше енергії. Енергозбереження є функцією розміру нагрівача і його температури, а також послідовності роботи машини. При температурі від 650 °C і вище нагрівач розжарюється до темно-червоного кольору. Розмірний ряд нагрівачів починається з 62 x 62 мм.



**Рис.1.21.** Поперечний переріз порожнистого керамічного нагрівача з термопарою: 1 – нагрівальна спіраль, 2 – високотемпературна ізоляція; 3 – керамічний кожух, 4 - запобіжна бобишка; 5 – термопара, або хвостовики термопар; 6 – електричне підведення до нагрівальної спіралі.

Використання керамічних та кварцових інфрачервоних випромінювачів при нагріванні полімерів збільшує продуктивність термоформувальних машин, збільшує їх ККД, зменшує витрати на виробництво та підвищує зручність користування. Вони не потребують постійного кваліфікованого обслуговування, строк служби нагрівачів складає приблизно 10000-12000 годин. Час розігрівання до необхідних температур для даних нагрівачів

складає не більше 6-7 хвилин. Застосування інфрачервоних керамічних та кварцових випромінювачів значно прискорює виробничий процес, збільшуючи економічну ефективність. При цьому підвищуються якісні характеристики готових виробів. За рахунок короткого часу реагування кварцові інфрачервоні випромінювачі рекомендується використовувати, передусім, в циклічних робочих процесах.

Діаграми розігрівання та охолодження інфрачервоних керамічних випромінювачів зображені на рис.1.22.

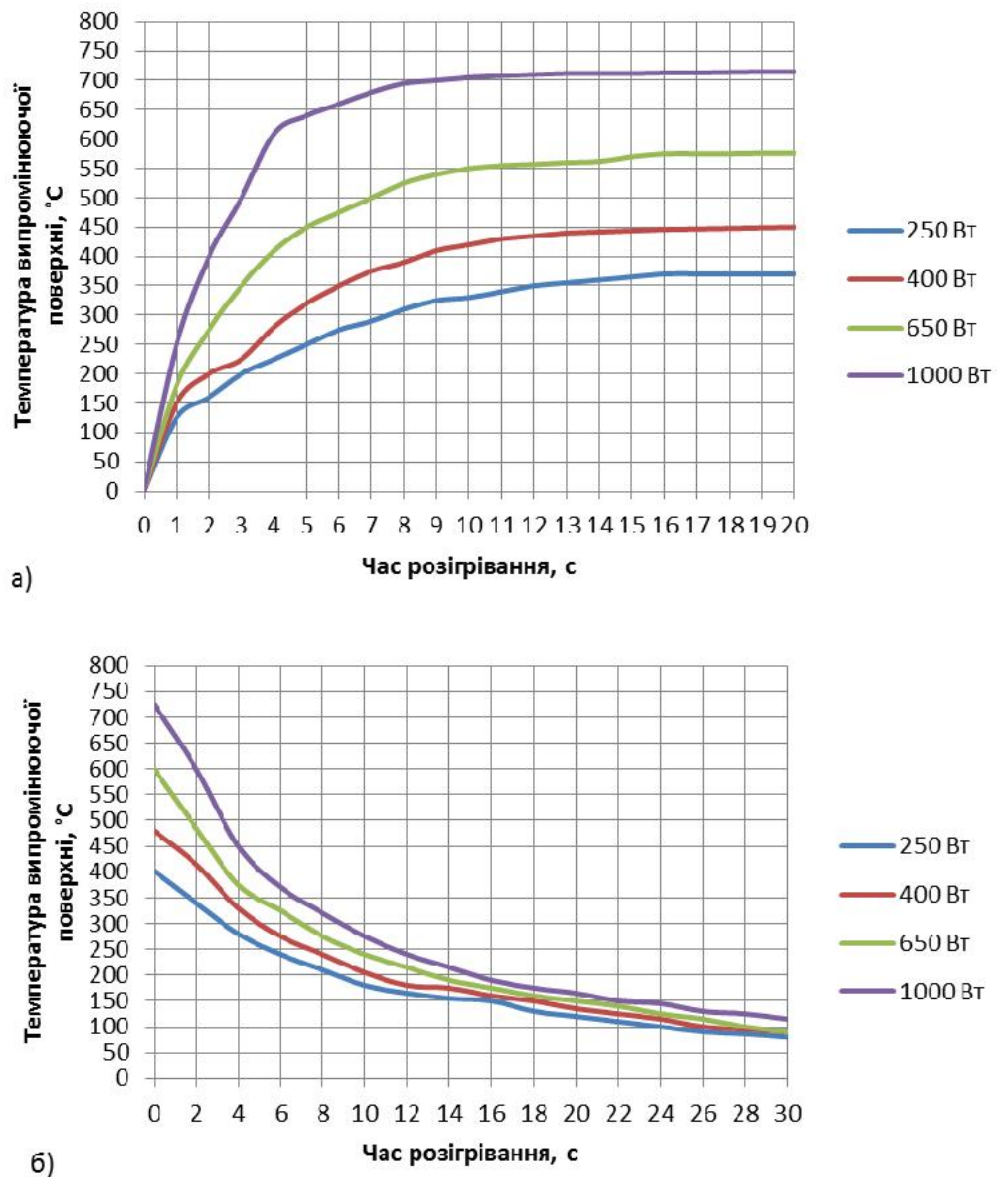
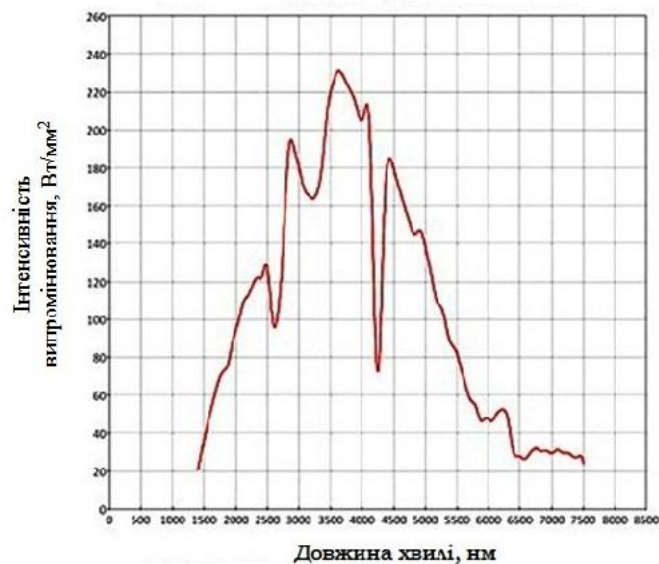


Рис.1.22. Графіки розігріву (а) та охолодження (б) керамічних ІЧ-випромінювачів.

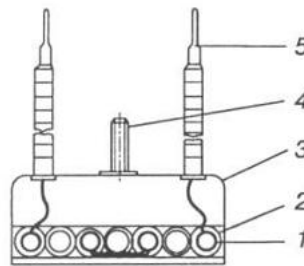
На рис.1.23 представлено спектр інтенсивності випромінювання ІЧ-випромінювача потужністю 1000 Вт. Зі збільшенням потужності випромінювача і, відповідно, температури випромінюючої поверхні зростає інтенсивність випромінювання, а спектр випромінювання зсувається в область менших довжин хвиль (закон зміщення Віна). При цьому пік інтенсивності випромінювання (85-90% спектра) припадає на діапазон довжин хвиль 1,5-6 мкм.



**Рис.1.23.** Інтенсивність випромінювання керамічних випромінювачів.

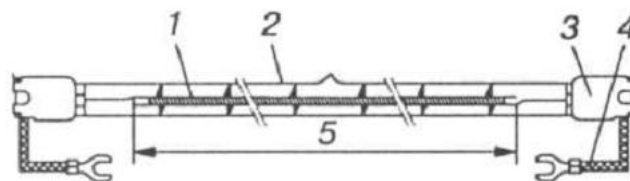
Кварцові лампи є трубками з кварцового скла, всередині яких міститься вольфрамова чи хромонікелева спіраль. Кварц має високу термостійкість, нечутливий до різких перепадів температур. Лампи мають інертний наповнювач, який дозволяє підтримувати температуру спіралі до 2500 °С. На рис. \_\_ показано нагрівач зі штучного кварцу. Сталева нагрівальна спіраль з хромонікелевим покриттям 1 розміщується в кварцових трубках зі штучного кварцу 2, відкритих з обох кінців. В залежності від потужності нагрівача спіраль може проходити тільки через кожну другу трубку. При ввімкненому нагрівачі спіраль набуває червоного кольору протягом 1-2 с і світиться через трубку. Кварцові трубки поглинають деякі промені від спіралі, повільно нагріваються, а потім випускають теплові промені в невидимій області. Розсіювання випромінювання є дуже великим. Хоча спіраль випромінює

червоне світло через 1-2 с після ввімкнення, не можна вважати, що нагрівач вже досяг своєї кінцевої температури. Це буде тільки тоді, коли нагріються трубки. Розмірний ряд нагрівачів починається з 62x62 мм. Нагрівачі з кварцового скла принципово сконструйовані аналогічно нагрівачам зі штучного кварцу, лише замість трубки зі штучного кварцу використовується трубка з кварцового скла. Також нагрівачі з кварцового скла обладнані трубкою з покриттям для внутрішнього відбиття.



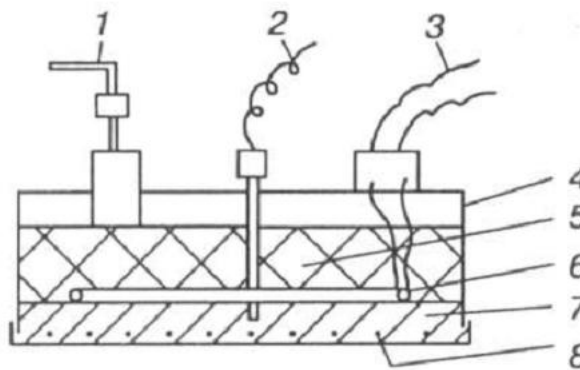
**Рис.1.24.** Поперечний переріз нагрівача зі штучного кварцу: 1 – нагрівальна спіраль; 2 – трубка з штучного кварцу, 3 – металевий кожух, 4 – кріплення, 5 – електричне підведення.

На рис.1.25 показано галогеновий нагрівач. Вольфрамова спіраль 1 центрується в заповненій галогеновим газом трубці з кварцового скла короткими відрізками. Хоча через низьку масу такий нагрівач є дуже швидкодіючим і може бути порівняний з лампою розжарювання, проте він має дуже вузьку смугу випромінювання. Тепло випромінюється тільки як ІЧ-складова випромінювання, в видимій зоні тепло не виділяється. Таким чином, через вузьку смугу випромінювання галогеновий нагрівач не придатний для дуже тонких матеріалів або полімерів певного виду і кольору.



**Рис.1.25.** Галогеновий нагрівач: 1 – нагрівальна спіраль; 2 – трубка з кварцового скла; 3 – стрижень запобіжника; 4 – електрична проводка, 5 – довжина нагрівальної спіралі.

На рис.1.26 показано газовий нагрівач, який попередньо нагрівається за допомогою електричного пускача 6. Потім вводиться газ, який горить у каталітичному шарі 7. Газовий нагрівач має широку смугу випромінювання з максимальною довжиною хвилі випромінювання від 4 до 6 мкм. В залежності від каталітичного шару діапазон температур на поверхні становить від 430 °С до 600 °С. Ефективність такого нагрівання подібна до нагрівання керамічним нагрівачем при однаковій температурі поверхні. Для газових нагрівачів потрібен кисень (повітря) і вони не придатні для використання в закритих камерах, які традиційно використовуються в термоформувальних машинах для нагрівання листів. Розмірний ряд нагрівачів починається від 110x110 мм.



**Рис.1.26.** Поперечний переріз газового нагрівача: 1 – підведення газу і запобіжний клапан; 2 – термопара; 3 – електрична проводка, 4 – кожух, 5 – ізолятор; 6 – електричний пускач, 7 – каталітичний шар, 8 – дротяна сітка.

Підсумки порівняння перерахованих вище типів ІЧ-випромінювачів наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Характеристика	Нагрівальний елемент			
	Керамічний	Кварцовий	Галогеновий	Газовий
1	2	3	4	5
Енергія	Електрика	Електрика	Електрика	Газ пропан <sup>1)</sup>
Перетворення енергії	Нагріті спіралі	Нагріті спіралі	Нагріті спіралі	Каталітичне горіння

1	2	3	4	5
<i>Джерело випромінювання</i>	Поверхня кераміки	Спіраль + поверхня штуч. кварцу(трубки)	Спіраль + поверхня кварцового скла	Покрите керамічне волокно
<i>Температура нагрівача</i>	300-700 °С максимум 800 °С	Спіралі <1100 °С; Штучн. кварц < 500°С	Спіралі < 2400 °С Кварц. скло< 950 °С	До 600 °С
<i>Питома вага</i>	Сучасний нагрівач легший ніж штучн. кварц <sup>2)</sup>	Важкий <sup>2)</sup>	Дуже легкий <sup>2)</sup>	-
<i>Час виходу на режим</i>	< 10 хв.	< 10 хв. <sup>3)</sup>	< 1с(3 хв.) <sup>4)</sup>	< 20 хв.
<i>Підключене навантаження</i>	16,6-25 кВт/м <sup>2</sup> (для 700 °С близько 38,4 кВт/м <sup>2</sup> )	16,6-50 кВт/м <sup>2</sup>	50-75 кВт/м <sup>2</sup>	1350 г бутан/м <sup>2</sup> . нагріта поверхня при макс. 430 °С також підведення повітря
<i>Споживання енергії при нагріванні</i>	Приблизно до 75% від підведеного значення <sup>5)</sup>	Приблизно до 75% від підведеного значення	Приблизно до 85% від підведеного значення	На 30% нижче від кераміки чи кварцу
<i>Споживання енергії за готовності</i>	Близько 25% від підключеного навантаження <sup>6)</sup>	Близько 25% від підключеного навантаження <sup>7)</sup>	0%	Близько 25% від підключеного навантаження
<i>Повна площа нагрівання</i>	Можлива	Можлива	Неможлива, досягається спеціальними відбивачами	Можлива
<i>Регулювання температури нагрівача</i>	Слабка	Для спіралей швидка, для штуч. кварцу слабка	Для спіралей дуже швидка, для кварц. скла відносно швидка, так як вона пропорційна видимому випромінюванню	Відносно довготривала
<i>Параметри установки на нагрівачі</i>	Установлена потужність у % або регулювання температури в °С <sup>8)</sup>	Установлена потужність у % <sup>9)</sup> (регулювання температури в °С як додаткова можливість)	Установлена потужність у %	Регулювання температури в °С

1	2	3	4	5
<i>Відтворюваність результатів нагрівання - короткий термін</i>	Як варіант «контроль температури на нагрівачі», дуже гарна <sup>10)</sup>	Гірше, коли регулювання нагрівача у % і відсутня ІЧ-складова на машині <sup>11)</sup>	Від гарної до найкращої <sup>12)</sup> , якщо температура матеріала на виході постійна	Прекрасна <sup>13)</sup> , але чутлива
<i>Відтворюваність результатів нагрівання - довготривалий термін</i>	Прекрасна <sup>14)</sup> , старі нагрівачі $\approx$ новим нагрівачам	Менш гарна, безумовно старі нагрівачі гірші за нові	Несприятлива, тому що дуже залежить від відбивача <sup>16)</sup>	Прекрасна <sup>13)</sup> , але чутлива
<i>Термін напрацювання</i>	~ 10000 год.	~ 5000 год.	~ 5000 год.	-
<i>Функції контролю</i>	Ретельно відпрацьовані	Прості, візуальні	Прості, візуальні	Прості, візуальні
<i>Температурне навантаження машини</i>	Високе <sup>17)</sup>	Високе <sup>17)</sup>	Дуже низьке <sup>18)</sup>	Середнє
<i>Область випромінювання (інтервал довжини хвилі)</i>	Широка, макс. при 3-5 мкм	Широка, макс. при 2-4 мкм	Вузька, макс. при 1-2 мкм	
<i>Застосовуваність</i>	Універсальна	Універсальна обмежена <sup>19)</sup>	Часткова	Універсальна
<i>Вплив кольору полімера</i>	Частково тотожна часу нагрівання	Майже тотожна часу нагрівання	Різний час нагрівання <sup>20)</sup>	-
<i>Область застосування в залежності від машини</i>	Універсальна	Універсальна	На сьогодні обмежена однопозиційними машинами для листів <sup>21)</sup>	Обмежена <sup>22)</sup>

## Примітки:

<sup>1)</sup>Гази метан або рідкий пропан.

<sup>2)</sup>Кераміка: Elstein HTS/2 розміром 122 x 62 мм, вагою 130 г; штучний кварц: TQS FSK розміром 124 x 62 мм, масою -178 г.

<sup>3)</sup>Сама спіраль змінює колір дуже швидко, а для інших матеріалів (кварцового скла, бічних керамічних штуцерів) потрібно майже стільки часу, як для керамічних нагрівачів.

4) Частка галогенових нагрівальних елементів в нагрівальному блоці за масою в 6 разів нижче, ніж нагрівачів зі штучного кварцу. Галогеновий нагрівач випромінює тепло відразу ж (після 0.2 с), а нагрівач з кварцового скла нагрівається пізніше.

5) Потужність нагрівача повинна бути обрана так, щоб вона дозволяла регулювати температуру на нагрівачі протягом часу нагрівання, навіть коли відбувається незначне зниження навантаження.

6) Коли система нагрівачів перебуває в режимі очікування вище відбивача без зниження температури нагрівача, споживання енергії знижується приблизно до 25% від підключеного навантаження в залежності від встановленої температури.

7) Аналогічно (6); відмінність полягає у відсутності регулювання температури. Тут встановлюється потужність. Температура на нагрівачі визначається різницею між встановленою споживаною енергією та енергією, яка постійно передається матеріалу і навколишньому середовищу.

8) Для більшості керамічних нагрівачів регулювання температури здійснюється шляхом зворотнього зв'язку. Нагрівачі з однаковими потужністю і тепловими втратами (в матеріалі чи в навколишнє середовище) об'єднуються разом і регулюються за допомогою нагрівального елемента із вбудованою термопарою у відповідній групі.

9) У цьому зв'язку варіант (8) не є прийнятним, хоча пілотні нагрівачі з вбудованою термопарою розроблені давно.

10) Продукція може виготовлятися без відходів, якщо зберігається профіль зміни температури, причому регулювання температури нагрівача здійснюється за допомогою достатньої кількості пілотних нагрівачів (не менше трьох в блоці нагрівачів) і при цьому нагрівачі досягли заданої температури.

11) Контроль вихідної потужності нагрівальних систем проводиться за потужністю нагрівача на вході. Однак температура, яка досягається на нагрівачі, залежить також від енергії, переданої в навколишнє середовище.

Може сплинути від 30 до 40хв., поки вся нагрівальна система не досягне постійної потужності випромінювання, якщо не використовується додаткове допоміжне обладнання (датчики рівня температури в системі нагрівачів, ІЧ-апаратура тощо) для скорочення стабілізаційного періоду. Контроль вихідної потужності для нагрівачів великої маси не має жодних переваг.

<sup>12)</sup> Низька маса радіаційних нагрівачів (нагрівач масою 25 г, потужністю 700 Вт, довжиною 165 мм) гарантує дуже короткий стабілізаційний час для досягнення температури випромінювання. Тільки крайні секції та ізолююча основа нагрівача, які також передають тепло за рахунок радіації, вимагають більшого часу для стабілізації. Без ІЧ-датчика слід очікувати відхилень при нагріванні перших формованих виробів. При використанні покриттів в нагрівальних системах час стабілізації збільшується приблизно до 20 хв.

<sup>13)</sup> Температура дуже сильно залежить від подачі повітря.

<sup>14)</sup> При часі нагрівання понад 200с практично немає різниці між старим забрудненим нагрівачем і новим нагрівачем.

<sup>15)</sup> Тільки при заміні старих нагрівачів краща нагрівальна здатність нових нагрівачів стане очевидною.

<sup>16)</sup> Якщо нагрівач залежить від гарного відбивача, наслідки наступні: з часом відбивачі забруднюються. Якщо бажано запобігти забрудненню, нагрівач можна захистити скляною керамічною пластиною. Вона сама по собі перетвориться на поверхню випромінювання, тобто стабілізаційний час для системи збільшиться через збільшення маси. Якщо придбано нагрівач з вбудованим відбивачем, то використання енергії та/або ефективність будуть гіршими, оскільки відбивач не відбиває 100%.

<sup>17)</sup> Це твердження стосується лише машин, в яких система нагрівачів відсувається від матеріалу в кожному циклі, коли вони не потрібні. Оскільки важкі нагрівачі переміщуються повільно через їх велику масу, вони повинні перебувати при робочій температурі в положенні паузи.

<sup>18)</sup> Для листових термоформерів нагрівання припиняється в положенні паузи. Однак пофарбованим частинам машини короткохвильове

випромінювання передає більше тепла, ніж в положенні нагрівання.

<sup>19)</sup>Існує ряд матеріалів, в основному тонкі прозорі матеріали, які навряд чи можуть бути повністю нагріті галогеновими нагрівачами.

<sup>20)</sup> Час нагрівання істотно залежить від кольору. Білі пластики вимагають значно тривалішого часу нагрівання, ніж чорні. Дво- або багатоколірні матеріали складно нагріти рівномірно.

<sup>21)</sup>Невід'ємною перевагою цих нагрівачів є малий вплив тепла на саму машину. Поточне споживання при нагріванні вище, ніж для керамічних нагрівачів або нагрівачів зі штучного кварцу. Галогеновий нагрівач компенсує своє більш високе енергоспоживання при нагріванні на однопозиційних машинах для листів тільки за рахунок відключення під час паузи.

<sup>22)</sup>Оскільки спалювання газу вимагає подачі повітря, цей вид нагрівання не може використовуватися в якості нижнього нагрівача на термоформувальних машинах з вбудованою пневмокамерою.

## Розділ 2. Теоретично-експериментальні дослідження.

### 2.1. Розрахунок показників ІЧ-випромінювання для процесу термоформування та проведення багатofакторного експерименту.

*Формулювання припущень та моделювання «чорного ящика».*

Досліджуючи, наприклад, «чорний» об'єкт дослідження (ОД), ми розглядаємо його як імовірно-статистичний об'єкт, що піддається дії керованих вхідних (Входи), управляючих (Управління) та непередбачених збурюючих (Збурення) факторів. Числові значення параметрів, закономірності зміни яких у часі експерименту вимірюються – це вихідні параметри, вони не є усталеними, тобто є імовірнісними: певному об'єму їх значень відповідатиме певна імовірність та надійність їх „появи”. Одночасно, отриманий об'єм значень «Виходів» підпадає під закони імовірних випадкових величин.

Отже, дослідити «чорний» ОД означає установити у формалізованому вигляді залежність вихідних параметрів від визначених вхідних факторів. Таку формалізовану взаємозалежність «Входи-Виходи» називають *математико-статистичною моделлю ОД*, яка має гарантовані якісні оцінки, а саме, є відтворюваною у часі та місці подальшого використання та є адекватною дослідженому ОД.



**Рис.2.1.** Модель «чорного ящика».

Об'єктом дослідження в даному випадку є процес нагрівання заготовки при термоформуванні. Вхідними факторами є теплопровідність, товщина листа та тривалість нагрівання заготовки. Вихідною величиною є рівномірність розподілу температури по площині листа.

Аналіз результатів експериментальних досліджень дозволив сформулювати наступні припущення, що враховують характеристики матеріалів та процесу:

1) нагріваний матеріал представляє собою одновірну систему шарів з поперечним напрямком теплових потоків, які характеризуються ідеальним контактом шарів між собою;

2) нагрівання здійснюється за рахунок теплопередачі від нагрівачів шляхом променевипускання (при радіаційному нагріванні) та теплопровідності (при контактному нагріванні) і внаслідок теплопровідності всередині матеріалу; при односторонньому радіаційному і контактному нагріванні охолодження відбувається в результаті тепловіддачі повітря шляхом конвекції і променевипускання;

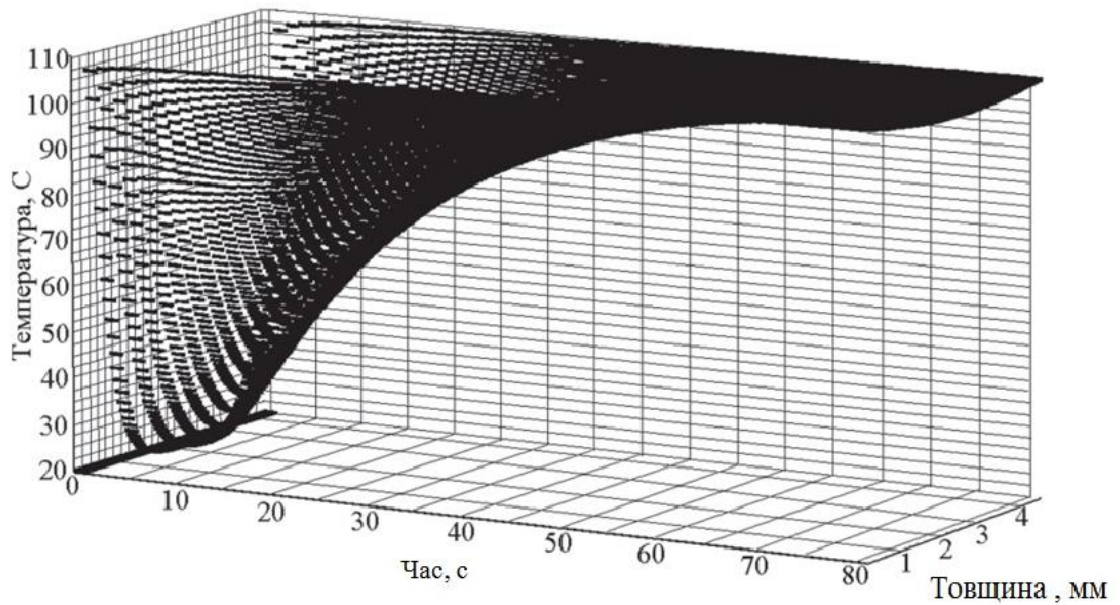
3) теплофізичні характеристики матеріалів шарів не змінюються при нагріванні;

4) тепловий потік, направлений від радіаційного нагрівача до одиниці поверхні матеріалу, розраховується відповідно до закону Стефана-Больцмана при умові, що випромінюючі тепло поверхні нагрівача і матеріалу рівні і паралельні;

5) при контактному нагріванні притискання матеріалу до нагрівальної плити є ідеальним, мікрозазори відсутні, тому локальний тепловий опір в місці контакту дуже малий.

Аналіз залежності показника однорідності розподілу температури по площі листа від часу нагрівання, товщини листа, теплопровідності матеріалу, які варіюються у заданих діапазонах, дозволяє сформулювати діапазони допустимих значень режимних параметрів, при яких неоднорідність температури не перевищує заданого значення.

Як приклад аналогічного математичного моделювання залежності рівномірності розподілу температури по товщині від часу нагрівання і температури нагрівачів, можна розглянути зображення поля температури пінополівінілхлорида на рис.2.2.



**Рис.2.2.** Розподіл температури по товщині шару та у часі.

В нашому випадку актуальним для створення математичної моделі процесу є багатофакторний активний експеримент, який дає змогу визначити експериментальним шляхом, варіюючи певні фактори, залежність параметра від цих факторів, а також ступінь впливу даних факторів на динаміку процесу.

Будь-який процес може бути описаний деякою залежністю параметра оптимізації  $y$  від діючих факторів  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ . Тому вивчення процесу можна представити як дослідження функції багатьох змінних, тобто знаходження залежності виду  $y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ , яка називається *функцією відгуку*. Так як справжній вигляд функції  $y=f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$  є невідомим, тому застосовують рівняння, що є розкладанням цієї функції у степеневий ряд:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i,j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (2.1)$$

де  $x_i, x_j$  – змінні фактори при  $i = 1 \dots n, j = 1 \dots n, i \neq j$ ;

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}, \beta_{ii}$  – коефіцієнти регресії при відповідних змінних.

Таке рівняння називають *рівнянням регресії*.

В загальному вигляді залежність рівномірності розподілу температури по товщині і площі листа від найсуттєвіших факторів можна представити як:

$$\Delta T = f(\lambda, \delta, \tau); \quad (2.2)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·К).

$\delta$  – товщина листа, м,

$\tau$  – час нагрівання заготовки, с.

Прийmemo початкові умови процесу:

Матеріал заготовки: поліпропілен (ПП);

Температура заготовки:  $T_0=25^\circ\text{C}=298\text{ K}$ ;

Температура плавлення:  $T_{\text{пл}}=160\text{-}175\text{ }^\circ\text{C}$ ;

Питома теплоємність:  $c=1,93\text{ кДж/ (кг}\cdot\text{K)}$ ;

Густина матеріала:  $\rho=1060\text{ кг/м}^3$ .

Інтенсивність теплового потоку від плоского нагрівача до заготовки, пропускна здатність якої дорівнює 0, визначається згідно закону Стефана-Больцмана для радіаційних нагрівачів:

$$q = \bar{G}M(T_1^4 - T_2^4), \quad (2.3)$$

де  $\bar{G}$  - стала Стефана-Больцмана,  $\bar{G} = 5,67 \cdot 10^{-8}\text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K}^4)$ ;

$M$  – коефіцієнт променевипускання,

$$M = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2}, \quad (2.4)$$

де  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$  – ступінь чорноти відповідно нагрівача і нагріваної поверхні,

$\varepsilon_1=0,93$  (для ІЧ-випромінювача),  $\varepsilon_2=0,91$  (для полімерів);

$T_1$  і  $T_2$  – температури відповідно нагрівача і нагріваної поверхні, К.

Для потужних нагрівачів, коли можна знехтувати впливом тепла, яке випромінюється поверхнею заготовки, формула (2.3) набуває вигляду:

$$q = \bar{G}MT_1^4, \quad (2.5)$$

Для одностороннього нагрівання заготовки температура на обігрівній поверхні визначається з формули:

$$T_{\text{max}} = T_0 + \frac{q\delta}{\lambda} \left[ \frac{a\tau}{\delta^2} + \frac{1}{3} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n'=1}^{\infty} \frac{1}{n'^2} \exp\left(-\pi^2 n'^2 \frac{a\tau}{\delta^2}\right) \right], \quad (2.6)$$

а на необігрівній поверхні:

$$T_{\text{min}} = T_0 + \frac{q\delta}{\lambda} \left[ \frac{a\tau}{\delta^2} - \frac{1}{6} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n'=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n'}}{n'^2} \exp\left(-\pi^2 n'^2 \frac{a\tau}{\delta^2}\right) \right], \quad (2.7)$$

де  $T_0$  – початкова температура заготовки, К;

$\delta$  – товщина стінки, м;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності поліпропілена, Вт/(м·К);

$a$  – коефіцієнт температуропровідності поліпропілена, м<sup>2</sup>/с;

$\tau$  – час нагрівання, с;

$n'$  – коефіцієнт, що характеризує період релаксації.

Величина коефіцієнту температуропровідності для одного і того самого матеріалу змінюється в залежності від його об'ємної ваги, температури та вологості. Він характеризує швидкість зміни (вирівнювання) температури матеріалу у нерівноважних теплових процесах і є мірою теплоінерційних властивостей речовини:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad (2.8)$$

Для варіанту двостороннього обігрівання  $T_{\max}$  розраховується для зовнішніх поверхонь заготовки, а  $T_{\min}$  – для серединної поверхні, при цьому у рівняння (2.6) і (2.7) замість величини  $\delta$  вводиться значення  $\delta/2$ .

Слід зауважити, що так як величини  $\sum_{n'=1}^{\infty} \frac{1}{n'^2} \exp(-\pi^2 n'^2 \frac{a\tau}{\delta^2})$  та  $\sum_{n'=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n'^2} \exp(-\pi^2 n'^2 \frac{a\tau}{\delta^2})$  є дуже малими, то в подальших розрахунках ними нехтуємо.

Рівномірність розподілу температури визначається з формули:

$$I_n = \frac{T_{\max} - T_0}{T_{\min} - T_0}, \quad (2.9)$$

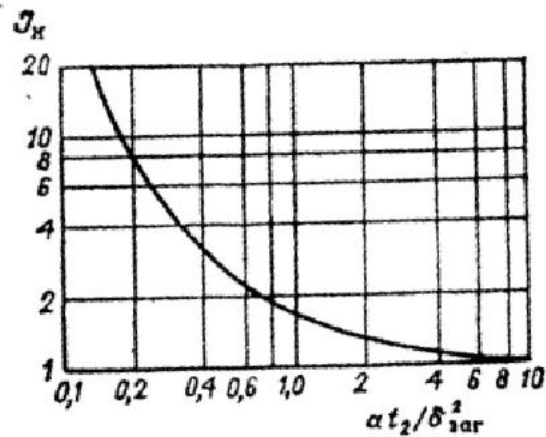
$$q = \bar{G}MT_1^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,8517 \cdot 573^4 = 5208 \text{ Вт/м}^2,$$

$$M = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2} = \frac{0,93 \cdot 0,91}{0,93 - 0,93 \cdot 0,91 + 0,91} = 0,8517.$$

Порівнюючи рівняння (2.6) і (2.7) можна переписати залежність рівномірності розподілу температури таким чином:

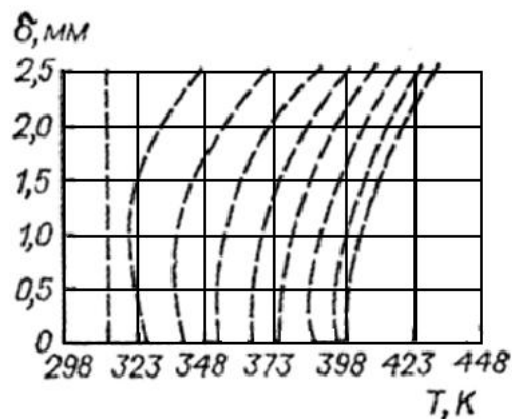
$$I_n = f\left(\frac{a\tau}{\delta^2}\right), \quad (2.10)$$

На рис.2.3 дана функція представлена графічно.



**Рис.2.3.** Залежність рівномірності розподілу температури  $J_H$  від  $\frac{\alpha t^2}{\delta_{\text{бар}}^2}$ .

Даний метод розрахунку є найпростішим та найдоступнішим, але він не враховує нестационарний режим нагрівання заготовок та виходить з лінійного розподілу температур по їх товщині. Характер дійсного розподілу температури в заготовці, що змінюється у часі (час нагрівання 75с, матеріал - УПС марки 475-К) показано на рис.2.4.



**Рис.2.4.** Розподіл температури по товщині зразка при нагріванні інфрачервоним випромінюванням.

Введемо необхідні для моделювання позначення:

$$I_H = y; \quad \lambda = x_1; \quad \delta = x_2; \quad \tau = x_3. \quad (2.11)$$

Далі можна записати:

$$y = f(x_1, x_2, x_3); \quad (2.12)$$

Очікуваний вид математико-статистичної моделі має форму поліному першого степеня:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1x_2 + b_5x_1x_3 + b_6x_2x_3 + b_7x_1x_2x_3, \quad (2.13)$$

де  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$  - очікувані коефіцієнти математичної моделі.

Визначимо кількість дослідів повного трьохфакторного експерименту:

$$N = 2^n = 2^3 = 8, \quad (2.14)$$

де  $n$  - кількість факторів.

Призначимо кількість повторюваних дослідів:

$$m = 10 \quad (2.15)$$

Нормалізуємо вихідне рівняння математико-статистичної моделі і отримаємо його у формі нормованого:

$$z_i = \frac{x_i - x_{0i}}{\Delta x_i}, \quad (2.16)$$

де  $z_i$  - нормоване значення і-фактора,  $z_i = \pm 1$ ;

$x_i$  - математичний запис і-фактора,

$x_{0i}$  - числове значення і-фактора на 0-рівні,

$\Delta x_i$  - крок варіювання і-змінної.

Математико-статистична модель набуває нормалізованого вигляду:

$$y = \beta_0 + \beta_1z_1 + \beta_2z_2 + \beta_3z_3 + \beta_4z_1z_2 + \beta_5z_1z_3 + \beta_6z_2z_3 + \beta_7z_1z_2z_3, \quad (2.17)$$

де  $\beta_i$  - оцінка коефіцієнта  $b_i$ .

**Побудова плану активного експерименту.** Вибираємо рівні та інтервали варіювання і-факторів:

Таблиця 2.1.

Рівні варіювання	$x_1$ (А, Вт/(м·К))	$x_2$ (δ, м)	$x_3$ (τ, с)
0-рівень	0,17	0,001	30
+ -рівень	0,18	0,0011	32
- -рівень	0,16	0,0009	28
Δx	0,01	0,0001	2

Проводимо експерименти у відповідності до матриці плану (таблиця 2.2), попередньо виконавши рандомізацію плану.

Таблиця 2.2.

$N_j$	$z_0$	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_1z_2$	$z_1z_3$	$z_2z_3$	$z_1z_2z_3$	$N_j$ ранд
1	+	+	+	+	+	+	+	+	5
2	+	-	+	+	-	-	+	-	7
3	+	+	-	+	-	+	-	-	1
4	+	-	-	+	+	-	-	+	8
5	+	+	+	-	+	-	-	-	3
6	+	-	+	-	-	+	-	+	2
7	+	+	-	-	-	-	+	+	4
8	+	-	-	-	+	+	+	-	6

Дана матриця плану має задовольняти трьом основним вимогам:

1. Симетричність:

$$\sum z_{ij} = 0, \quad (2.18)$$

де  $i=1,2,\dots,n$  – номер фактора (стовпчика),

$j=1,2,\dots,N$  – номер досліду (рядка).

2. Нормованість:

$$\sum z_{ij}^2 = N, \quad (2.19)$$

3. Ортогональність:

$$\sum (z_{ij}z_{kj}) = 0. \quad (2.20)$$

### Експеримент №1 (3)

Товщина стінки виробу:  $\delta = 0,0009$  м,

Час нагрівання заготовки:  $\tau = 32$  с,

Коефіцієнт теплопровідності ПП:  $\lambda = 0,18$  Вт/(м·К),

Коефіцієнт температуропровідності ПП:  $a = 10,1 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с,

$$T_{\max} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0009}{0,18} \left[ \frac{10,1 \cdot 10^{-8} \cdot 32}{0,0009^2} + 0,333 \right] = 298 + 26,04 [3,99 + 0,333] = 410,57 \text{ К};$$

$$T_{\min} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0009}{0,18} \left[ \frac{10,1 \cdot 10^{-8} \cdot 0,01}{0,0009^2} - 0,167 \right] = 298 + 26,04 [3,99 - 0,167] = 401,46 \text{ К}.$$

$$I_n = \frac{410,57 - 290}{401,46 - 298} = 1,088.$$

### Експеримент № 2 (6)

Товщина стінки виробу:  $\delta=0,0011$  м,

Час нагрівання заготовки:  $\tau=28$  с,

Коефіцієнт теплопровідності ПП:  $\lambda=0,16$  Вт/(м·К),

Коефіцієнт температуропровідності ПП:  $a=9,1 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с,

$$T_{\max} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0011}{0,16} \left[ \frac{9,1 \cdot 10^{-8} \cdot 28}{0,0011^2} + 0,333 \right] = 298 + 35,81[2,11 + 0,333] = 385,48 \text{ К};$$

$$T_{\min} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0011}{0,16} \left[ \frac{9,1 \cdot 10^{-8} \cdot 28}{0,0011^2} - 0,167 \right] = 298 + 35,81[2,11 - 0,167] = 367,58 \text{ К}.$$

$$I_n = \frac{385,48 - 298}{367,58 - 298} = 1,257.$$

### Експеримент № 3 (5)

Товщина стінки виробу:  $\delta=0,0011$  м,

Час нагрівання заготовки:  $\tau=28$  с,

Коефіцієнт теплопровідності ПП:  $\lambda=0,18$  Вт/(м·К),

$$T_{\max} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0011}{0,18} \left[ \frac{10,1 \cdot 10^{-8} \cdot 28}{0,0011^2} + 0,333 \right] = 298 + 31,83[2,34 + 0,333] = 383,08 \text{ К};$$

$$T_{\min} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0011}{0,18} \left[ \frac{10,1 \cdot 10^{-8} \cdot 28}{0,0011^2} - 0,167 \right] = 298 + 31,83[2,34 - 0,167] = 367,17 \text{ К}.$$

$$I_n = \frac{383,08 - 298}{367,17 - 298} = 1,23.$$

**Експеримент № 4 (7)**

Товщина стінки виробу:  $\delta=0,0009$  м,

Час нагрівання заготовки:  $\tau=28$  с,

Коефіцієнт теплопровідності ПП:  $\lambda=0,18$  Вт/(м·К),

Коефіцієнт температуропровідності ПП:  $a=10,1 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с,

$$T_{\max} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0009}{0,18} \left[ \frac{10,1 \cdot 10^{-8} \cdot 28}{0,0009^2} + 0,333 \right] = 298 + 26,04 [3,49 + 0,333] = 397,55 \text{ К};$$

$$T_{\min} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0009}{0,18} \left[ \frac{10,1 \cdot 10^{-8} \cdot 28}{0,0009^2} - 0,167 \right] = 298 + 26,04 [3,49 - 0,167] = 384,53 \text{ К}.$$

$$I_n = \frac{397,55 - 290}{384,53 - 298} = 1,15.$$

**Експеримент № 5 (1)**

Товщина стінки виробу:  $\delta=0,0011$  м,

Час нагрівання заготовки:  $\tau=32$  с,

Коефіцієнт теплопровідності ПП:  $\lambda=0,18$  Вт/(м·К),

Коефіцієнт температуропровідності ПП:  $a=10,1 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с,

$$T_{\max} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0011}{0,18} \left[ \frac{10,1 \cdot 10^{-8} \cdot 32}{0,0011^2} + 0,333 \right] = 298 + 31,83 [2,67 + 0,333] = 393,59 \text{ К};$$

$$T_{\min} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0011}{0,18} \left[ \frac{10,1 \cdot 10^{-8} \cdot 32}{0,0011^2} - 0,167 \right] = 298 + 31,83 [2,67 - 0,167] = 377,67 \text{ К}.$$

$$I_n = \frac{393,59 - 298}{377,67 - 298} = 1,2.$$

**Експеримент № 6 (8)**

Товщина стінки виробу:  $\delta=0,0009$  м,

Час нагрівання заготовки:  $\tau=28$  с,

Коефіцієнт теплопровідності ПП:  $\lambda=0,16$  Вт/(м·К),

Коефіцієнт температуропровідності ПП:  $a=9,1 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с,

$$T_{\max} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0009}{0,16} \left[ \frac{9,1 \cdot 10^{-8} \cdot 28}{0,0009^2} + 0,333 \right] = 298 + 29,3 [3,15 + 0,333] = 400,05 \text{ К};$$

$$T_{\min} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0009}{0,16} \left[ \frac{9,1 \cdot 10^{-8} \cdot 28}{0,0009^2} - 0,167 \right] = 298 + 29,3 [3,15 - 0,167] = 385,4 \text{ К}.$$

$$I_n = \frac{400,05 - 290}{385,4 - 298} = 1,168.$$

#### Експеримент № 7 (2)

Товщина стінки виробу:  $\delta=0,0011$  м,

Час нагрівання заготовки:  $\tau=32$  с,

Коефіцієнт теплопровідності ПП:  $\lambda=0,16$  Вт/(м·К),

Коефіцієнт температуропровідності ПП:  $a=9,1 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с,

$$T_{\max} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0011}{0,16} \left[ \frac{9,1 \cdot 10^{-8} \cdot 32}{0,0011^2} + 0,333 \right] = 298 + 43,1 [2,41 + 0,333] = 416,22 \text{ К};$$

$$T_{\min} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0011}{0,16} \left[ \frac{9,1 \cdot 10^{-8} \cdot 32}{0,0011^2} - 0,167 \right] = 298 + 43,1 [2,41 - 0,167] = 394,67 \text{ К}.$$

$$I_n = \frac{416,22 - 298}{394,67 - 298} = 1,223.$$

#### Експеримент № 8 (4)

Товщина стінки виробу:  $\delta = 0,0009$  м,

Час нагрівання заготовки:  $\tau = 32$  с,

Коефіцієнт теплопровідності ПП:  $\lambda = 0,16$  Вт/(м·К),

Коефіцієнт температуропровідності ПП:  $a = 9,1 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с,

$$T_{\max} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0009}{0,16} \left[ \frac{9,1 \cdot 10^{-8} \cdot 32}{0,0009^2} + 0,333 \right] = 298 + 29,3[3,6 + 0,333] = 413,24 \text{ К};$$

$$T_{\min} = 298 + \frac{5208 \cdot 0,0009}{0,16} \left[ \frac{9,1 \cdot 10^{-8} \cdot 32}{0,0009^2} - 0,167 \right] = 298 + 29,3[3,6 - 0,167] = 398,59 \text{ К}.$$

$$I_{\text{н}} = \frac{413,24 - 298}{398,59 - 298} = 1,146.$$

Таблиця 2.3.

№	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>5</sub>	y <sub>6</sub>	y <sub>7</sub>	y <sub>8</sub>	y <sub>9</sub>	y <sub>10</sub>	y <sub>сер</sub>
1	1,088	1,067	1,073	1,08	1,082	1,085	1,087	1,094	1,099	1,088	1,084
2	1,257	1,27	1,242	1,245	1,264	1,253	1,255	1,251	1,262	1,259	1,256
3	1,23	1,251	1,221	1,23	1,228	1,232	1,236	1,237	1,241	1,247	1,235
4	1,15	1,152	1,156	1,158	1,142	1,149	1,16	1,163	1,147	1,161	1,154
5	1,2	1,194	1,206	1,209	1,208	1,211	1,215	1,216	1,218	1,227	1,21
6	1,168	1,17	1,165	1,167	1,175	1,179	1,182	1,152	1,158	1,163	1,168
7	1,223	1,211	1,217	1,22	1,224	1,228	1,23	1,232	1,235	1,241	1,226
8	1,146	1,142	1,144	1,228	1,137	1,143	1,15	1,149	1,157	1,163	1,146

**Визначення необхідної кількості серій дослідів.** Згідно з першим дослідом середній результат становить  $y_{\text{сер}} = 1,084$ , дисперсія окремого результату

$$S_1^2 = (10 - 1)^{-1} [(1,088 - 1,084)^2 + (1,067 - 1,084)^2 + (1,073 - 1,084)^2 + (1,08 - 1,084)^2 + (1,082 - 1,084)^2 + (1,085 - 1,084)^2 + (1,087 - 1,084)^2 + (1,094 - 1,084)^2 + (1,099 - 1,084)^2 + (1,085 - 1,084)^2] = 0,111(0,000016 + 0,000289 + 0,000121 + 0,000016 + 0,000004 + 0,000001 + 0,000009 + 0,0001 + 0,000225 + 0,000001) = 0,111 \cdot 0,000782 = 0,0000868.$$

Середньоквадратична похибка окремого результату

$$S_1 = \sqrt{s_1^2} = \sqrt{0.0000868} = 0.00932. \quad (2.21)$$

Середньоквадратична похибка середнього результату

$$S_{\bar{y}} = \frac{S_1}{\sqrt{m}} = \frac{0.00932}{\sqrt{10}} = 0.00295. \quad (2.22)$$

Відповідно до таблиць при рівні значущості  $\alpha=0,05$  та  $f_2 = N - 1 = 9$   
 $t_T = 2.26$ .

Величина довірчої похибки (абсолютна похибка)

$$\varepsilon_{\bar{y}} = t_T \cdot S_{\bar{y}} = 2,26 \cdot 0,00295 = 0,00667. \quad (2.23)$$

Відносна похибка складає

$$\Delta = \frac{\varepsilon_{\bar{y}}}{\bar{y}} = \frac{0,00667}{1,084} \cdot 100\% = 0,62\%. \quad (2.24)$$

Для отримання відносної похибки в 5% розрахуємо значення  $\varepsilon_{\bar{y}}$

$$\varepsilon_{\bar{y}} = \frac{\bar{y}}{100} \cdot 5 = \frac{1,084}{100} \cdot 5 = 0,054. \quad (2.25)$$

Розрахункове значення  $t_{(\alpha,f)}$  при цьому визначається з формули

$$t_{(\alpha,f)} = \frac{\varepsilon_{\bar{y}}}{S_1} \sqrt{m} = \frac{0,00667}{0,00932} \sqrt{10} = 0,72\sqrt{10}. \quad (2.26)$$

Необхідно підібрати таку кількість дослідів, щоб виконувалась умова

$$t_{(\alpha,f)_P} > t_{(\alpha,f)_T}. \quad (2.27)$$

Якщо провести 10 дослідів, тоді  $f = m - 1 = 10 - 1 = 9$  та згідно довідкових даних при  $\alpha=0,05$   $t_{(\alpha,f)_P} = 0.72\sqrt{10} = 2.28$ . Так як  $t_{(\alpha,f)_P} > t_{(\alpha,f)_T}$ , то кількість дослідів залишаємо рівною 10.

**Перевірка гіпотези нормальності закону розподілення випадкової величини.** Діапазон зміни випадкової величини у вибірці 1,067-1,099 поділимо на  $k$  інтервалів

$$k = 1 + 3.2 \lg m = 1 + 3.2 \cdot 0.9 = 3.88 \cong 4. \quad (2.28)$$

Довжини інтервалів є однаковими і визначаються з формули

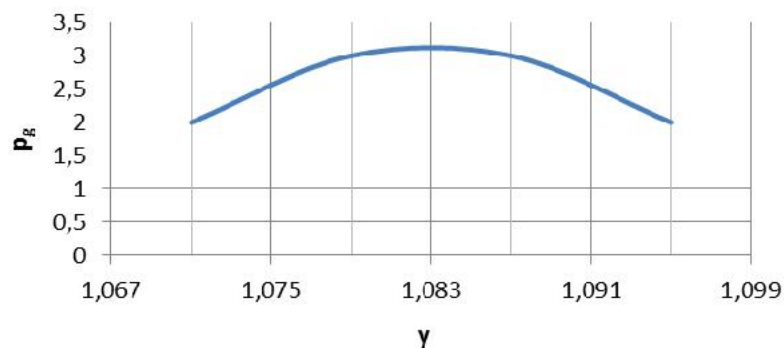
$$\Delta g = \frac{Y_{\max} - Y_{\min}}{k} = \frac{1,099 - 1,067}{4} = 0,008. \quad (2.29)$$

Далі визначимо кількість  $n_g$  елементів вибірки, які потрапили в кожен з інтервалів  $\Delta g$ , та відносну частоту потрапляння випадкової величини у відповідний інтервал

$$p_g = \frac{n_g}{m}, \quad (2.30)$$

$$p_{g1} = \frac{2}{10} = 0,2; \quad p_{g2} = \frac{3}{10} = 0,3; \quad p_{g3} = \frac{3}{10} = 0,3; \quad p_{g4} = \frac{2}{10} = 0,2.$$

Визначимо середнє значення по кожному інтервалу, призначимо його для відповідних елементів вибірки, які потрапили у кожен інтервал та побудуємо гістограму (рис.2.5.).



**Рис.2.5.** Гістограма  $p_g$ -у.

**Статистична обробка даних.** Перевіримо однорідність вибірових дисперсій. Вибіркові оцінки дисперсій змінних знаходимо за виразом:

$$S_{lj}^2 = (m - 1)^{-1} \sum_{i=1}^m (y_{lj} - \bar{y}_j)^2, \quad (2.31)$$

де  $l=1,2,\dots,m$  – кількість дублів,

$j=1,2,\dots,N$  – кількість дослідів.

$$\begin{aligned} S_{1j}^2 = & (10 - 1)^{-1} [(1.088 - 1.084)^2 + (1.257 - 1.256)^2 + (1.23 - 1.235)^2 + \\ & + (1.15 - 1.154)^2 + (1.2 - 1.21)^2 + (1.168 - 1.160)^2 + (1.223 - 1.226)^2 + \\ & + (1.146 - 1.146)^2] = 0.111(0,000016 + 0,000001 + 0,000025 + \\ & 0,000016 + 0,0001 + 0,000009) = 0.111 \cdot 0,000167 = 0,000185; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{2j}^2 = & (10 - 1)^{-1} [(1.067 - 1.084)^2 + (1.27 - 1.256)^2 + (1.251 - 1.235)^2 + \\ & + (1.152 - 1.154)^2 + (1.194 - 1.21)^2 + (1.17 - 1.168)^2 + (1.211 - \\ & 1.226)^2 + (1.142 - 1.146)^2] = 0.111(0,000289 + 0,000196 + 0,000256 + \\ & 0,000004 + 0,000256 + 0,000004 + 0,000225 + 0,000016) = 0.111 \cdot \\ & 0,001246 = 0,001383; \end{aligned}$$

$$S_{3j}^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.073 - 1.084)^2 + (1.242 - 1.256)^2 + (1.221 - 1.235)^2 + (1.156 - 1.154)^2 + (1.206 - 1.21)^2 + (1.165 - 1.168)^2 + (1.217 - 1.226)^2 + (1.144 - 1.146)^2] - 0.111(0,000121 + 0,000196 + 0,000196 + 0,000004 + 0,000016 + 0,000009 + 0,000081 + 0,000004) - 0.111 \cdot 0,000677 = 0,0000696;$$

$$S_{4j}^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.08 - 1.084)^2 + (1.245 - 1.256)^2 + (1.23 - 1.235)^2 + (1.158 - 1.154)^2 + (1.209 - 1.21)^2 + (1.167 - 1.168)^2 + (1.22 - 1.226)^2 + (1.128 - 1.146)^2] = 0.111(0,000016 + 0,000121 + 0,000025 + 0,000016 + 0,000001 + 0,000001 + 0,000036 + 0,000324) = 0.111 \cdot 0,00054 = 0,0000599;$$

$$S_{5j}^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.082 - 1.084)^2 + (1.264 - 1.256)^2 + (1.228 - 1.235)^2 + (1.142 - 1.154)^2 + (1.208 - 1.21)^2 + (1.175 - 1.168)^2 + (1.224 - 1.226)^2 + (1.137 - 1.146)^2] - 0.111(0,000004 + 0,000064 + 0,000049 + 0,000144 + 0,000004 + 0,000049 + 0,000004 + 0,000081) - 0.111 \cdot 0,000399 = 0,0000433;$$

$$S_{6j}^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.085 - 1.084)^2 + (1.253 - 1.256)^2 + (1.232 - 1.235)^2 + (1.149 - 1.154)^2 + (1.211 - 1.21)^2 + (1.179 - 1.168)^2 + (1.228 - 1.226)^2 + (1.143 - 1.146)^2] = 0.111(0,000001 + 0,000009 + 0,000009 + 0,000025 + 0,000001 + 0,000121 + 0,000004 + 0,000009) = 0.111 \cdot 0,000179 = 0,0000199;$$

$$S_{7j}^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.087 - 1.084)^2 + (1.255 - 1.256)^2 + (1.236 - 1.235)^2 + (1.16 - 1.154)^2 + (1.215 - 1.21)^2 + (1.182 - 1.168)^2 + (1.23 - 1.226)^2 + (1.15 - 1.146)^2] - 0.111(0,000009 + 0,000001 + 0,000001 + 0,000036 + 0,000025 + 0,000196 + 0,000016 + 0,000016) - 0.111 \cdot 0,0003 = 0,0000333;$$

$$S_{8j}^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.094 - 1.084)^2 + (1.251 - 1.256)^2 + (1.237 - 1.235)^2 + (1.163 - 1.154)^2 + (1.216 - 1.21)^2 + (1.152 - 1.168)^2 + (1.232 - 1.226)^2 + (1.149 - 1.146)^2] - 0.111(0,0001 + 0,000025 + 0,000004 + 0,000081 + 0,000036 + 0,000256 + 0,000036 + 0,000009) - 0.111 \cdot 0,000547 = 0,0000607;$$

$$S_{9j}^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.099 - 1.084)^2 + (1.262 - 1.256)^2 + (1.241 - 1.235)^2 + (1.147 - 1.154)^2 + (1.218 - 1.21)^2 + (1.158 - 1.168)^2 + (1.235 - 1.226)^2 + (1.157 - 1.146)^2] - 0.111(0,000225 + 0,000036 + 0,000036 + 0,000049 + 0,000064 + 0,0001 + 0,000081 + 0,000121) - 0.111 \cdot 0,000712 = 0,000079;$$

$$S_{10j}^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.085 - 1.084)^2 + (1.259 - 1.256)^2 + (1.247 - 1.235)^2 + (1.161 - 1.154)^2 + (1.227 - 1.21)^2 + (1.163 - 1.168)^2 + (1.241 - 1.226)^2 + (1.163 - 1.146)^2] = 0.111(0,000001 + 0,000009 + 0,000144 + 0,000049 + 0,000289 + 0,000025 + 0,000225 + 0,000289) = 0.111 \cdot 0,001031 = 0,0001144.$$

$$S_{ij}^2_{max} = 0,0001383.$$

$$\sum S_{ij}^2 = 0,0000185 + 0,0001383 + 0,0000696 + 0,0000599 + 0,0000443 + 0,0000199 + 0,0000333 + 0,0000607 + 0,000079 + 0,0001144 - 0,0006379;$$

Оцінки дисперсій знаходяться з формули:

$$S_{ji}^2 = (m - 1)^{-1} \sum_{i=1}^m (y_{mj} - \bar{y}_j)^2, \quad (2.32)$$

де  $m$  – кількість дублів,

$j=1,2,\dots,N$  – номер дослідю,

$i=1,2,\dots,n$  – номер фактора.

$$S_1^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.088 - 1.084)^2 + (1.067 - 1.084)^2 + (1.073 - 1.084)^2 + (1.08 - 1.084)^2 + (1.082 - 1.084)^2 + (1.085 - 1.084)^2 + (1.087 - 1.084)^2 + (1.094 - 1.084)^2 + (1.099 - 1.084)^2 + (1.085 - 1.084)^2] = 0.111(0,000016 + 0,000289 + 0,000121 + 0,000016 + 0,000004 + 0,000001 + 0,000009 + 0,0001 + 0,000225 + 0,000001) = 0,111 \cdot 0,000782 = 0,0000868;$$

$$S_2^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.257 - 1.256)^2 + (1.27 - 1.256)^2 + (1.242 - 1.256)^2 + (1.245 - 1.256)^2 + (1.264 - 1.256)^2 + (1.253 - 1.256)^2 + (1.255 - 1.256)^2 + (1.251 - 1.256)^2 + (1.262 - 1.256)^2 + (1.259 - 1.256)^2] = 0.111(0,000001 + 0,000196 + 0,000196 + 0,000121 + 0,000064 + 0,000009 + 0,000001 + 0,000025 + 0,000036 + 0,000009) = 0,111 \cdot 0,000658 = 0,000073;$$

$$S_3^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.23 - 1.235)^2 + (1.251 - 1.235)^2 + (1.221 - 1.235)^2 + (1.23 - 1.235)^2 + (1.228 - 1.235)^2 + (1.232 - 1.235)^2 + (1.236 - 1.235)^2 + (1.237 - 1.235)^2 + (1.241 - 1.235)^2 + (1.247 - 1.235)^2] = 0.111(0,000025 + 0,000256 + 0,000196 + 0,000025 + 0,000049 + 0,000009 + 0,000001 + 0,000004 + 0,000036 + 0,000144) = 0,111 \cdot 0,000745 = 0,0000827 ;$$

$$S_4^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.15 - 1.154)^2 + (1.152 - 1.154)^2 + (1.156 - 1.154)^2 + (1.158 - 1.154)^2 + (1.142 - 1.154)^2 + (1.149 - 1.154)^2 + (1.16 - 1.154)^2 + (1.163 - 1.154)^2 + (1.147 - 1.154)^2 + (1.161 - 1.154)^2] = 0.111(0,000016 + 0,000004 + 0,000004 + 0,000016 + 0,000144 + 0,000025 + 0,000036 + 0,000081 + 0,000049 + 0,000049) = 0,111 \cdot 0,000424 = 0,0000471 ;$$

$$S_5^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.2 - 1.21)^2 + (1.194 - 1.21)^2 + (1.206 - 1.21)^2 + (1.209 - 1.21)^2 + (1.208 - 1.21)^2 + (1.211 - 1.21)^2 + (1.215 - 1.21)^2 + (1.216 - 1.21)^2 + (1.218 - 1.21)^2 + (1.227 - 1.21)^2] = 0.111(0,0001 + 0,000256 + 0,000016 + 0,000001 + 0,000004 + 0,000001 + 0,000025 + 0,000036 + 0,000064 + 0,000289) = 0,111 \cdot 0,000792 = 0,0000879 ;$$

$$S_6^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.168 - 1.168)^2 + (1.17 - 1.168)^2 + (1.165 - 1.168)^2 + (1.167 - 1.168)^2 + (1.175 - 1.168)^2 + (1.179 - 1.168)^2 + (1.182 - 1.168)^2 + (1.152 - 1.168)^2 + (1.158 - 1.168)^2 + (1.163 - 1.168)^2] = 0.111(0,000004 + 0,000009 + 0,000001 + 0,000049 + 0,000121 + 0,000196 + 0,000256 + 0,0001 + 0,000025) = 0,111 \cdot 0,000761 = 0,0000845 ;$$

$$S_7^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.223 - 1.226)^2 + (1.211 - 1.226)^2 + (1.217 - 1.226)^2 + (1.22 - 1.226)^2 + (1.224 - 1.226)^2 + (1.228 - 1.226)^2 + (1.23 - 1.226)^2 + (1.232 - 1.226)^2 + (1.235 - 1.226)^2 + (1.241 - 1.226)^2] = 0.111(0,000009 + 0,000025 + 0,000081 + 0,000036 + 0,000004 + 0,000004 + 0,000016 + 0,000036 + 0,000081 + 0,000225) = 0,111 \cdot 0,000517 = 0,0000574 ;$$

$$S_8^2 = (10 - 1)^{-1} [(1.146 - 1.146)^2 + (1.142 - 1.146)^2 + (1.144 - 1.146)^2 + (1.128 - 1.146)^2 + (1.137 - 1.146)^2 + (1.143 - 1.146)^2 + (1.15 - 1.146)^2 + (1.149 - 1.146)^2 + (1.157 - 1.146)^2 + (1.163 - 1.146)^2] = 0.111(0,000016 + 0,000064 + 0,000324 + 0,000081 + 0,000009 + 0,000016 + 0,000009 + 0,000121 + 0,000289) = 0,111 \cdot 0,000869 = 0,0000965 .$$

$$S_{\bar{y}i \max}^2 = 0,0000965;$$

$$\sum S_{\bar{y}i}^2 = 0,0000868 + 0,000073 + 0,0000827 + 0,0000471 + 0,0000879 + 0,0000845 + 0,0000574 + 0,0000965 = 0,0006159;$$

Розрахуємо критерій Кохрена:

$$G_p = \frac{S_{\bar{y}i \max}^2}{\sum S_{\bar{y}j}^2}, \quad (2.33)$$

$$G_{p_a} = \frac{0,0001383}{0,0006379} = 0.217;$$

Так як  $G_p = \Phi(f_1, f_2, \alpha)$ , причому

$$f_1 = m - 1 = 10 - 1 = 9; \quad (2.34)$$

$$f_2 = N = 8; \quad (2.35)$$

то за таблицями при значенні рівня значущості  $\alpha = 0,05$

$$G_p^T = 0,2768.$$

Виходячи з умови  $G_{p_a} < G_p^T$ , можна стверджувати, що  $H_0$ -гіпотеза однорідності дисперсій приймається та отримані дані є відтворюваними.

$$G_{p_B} = \frac{0,0000965}{0,0006159} = 0.157;$$

Так як  $G_{p_B} < G_p^T$ , то  $H_0$ -гіпотеза однорідності дисперсій підтверджується.

Розрахуємо генеральну дисперсію відтворюваності (похибку досліду):

$$S_0^2 = \frac{\sum s_{\bar{y}}^2}{N}; \quad S_{0_a}^2 = \frac{\sum_1^m s_{\bar{y}}^2}{N}; \quad S_{0_B}^2 = \frac{\sum_1^N s_{\bar{y}}^2}{N}. \quad (2.36)$$

$$S_{0_a}^2 = \frac{0,0006379}{8} = 0.0000797;$$

$$S_{0_B}^2 = \frac{0,0006159}{8} = 0.0000769.$$

Визначимо незалежні оцінки коефіцієнтів  $b_i$ :

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N (z_{ji} \bar{y}_i)}{N}; \quad (2.37)$$

$$b_0 = \frac{1}{8} (1,084 + 1,256 + 1,235 + 1,154 + 1,21 + 1,168 + 1,226 + 1,146) = 0,125 \cdot 9,479 = 1.185;$$

$$b_1 = \frac{1}{8}(1,084 - 1,256 + 1,235 - 1,154 + 1,21 - 1,168 + 1,226 - 1,146) = 0,125 \cdot 0,031 = 0,00388;$$

$$b_2 = \frac{1}{8}(1,084 + 1,256 - 1,235 - 1,154 + 1,21 + 1,168 - 1,226 - 1,146) = 0,125 \cdot (-0,043) = -0,00538;$$

$$b_3 = \frac{1}{8}(1,084 + 1,256 + 1,235 + 1,154 - 1,21 - 1,168 - 1,226 - 1,146) = 0,125 \cdot (-0,021) = -0,00263;$$

$$b_4 = \frac{1}{8}(1,084 - 1,256 - 1,235 + 1,154 + 1,21 - 1,168 - 1,226 + 1,146) = 0,125 \cdot (-0,291) = -0,0364;$$

$$b_5 = \frac{1}{8}(1,084 - 1,256 + ,235 - 1,154 - 1,21 + 1,168 - 1,226 + 1,146) = 0,125 \cdot (-0,213) = -0,0266;$$

$$b_6 = \frac{1}{8}(1,084 + 1,256 - 1,235 - 1,154 - 1,21 - 1,168 + 1,226 + 1,146) = 0,125 \cdot (-0,055) = -0,00688;$$

$$b_7 = \frac{1}{8}(1,084 - 1,256 - 1,235 + 1,154 - 1,21 + 1,168 + 1,226 - 1,146) = 0,125 \cdot (-0,215) = 0,0269.$$

Перевіримо 0-гіпотезу про значущість отриманих оцінок коефіцієнтів  $b_i$ .

$$S_{\beta_j}^2 = \frac{S_n^2}{N}; \quad (2.38)$$

$$S_{\beta_j \alpha}^2 = \frac{0.0000797}{8} = 0.00000996; \quad S_{\beta_j \beta}^2 = \frac{0.0000769}{8} = 0.00000961.$$

Середнє квадратичне відхилення:

$$S_{\beta \alpha} = \sqrt{S_{\beta_j \alpha}^2} = \sqrt{0.00000996} = 0,00316;$$

$$S_{\beta \beta} = \sqrt{S_{\beta_j \beta}^2} = \sqrt{0.00000961} = 0,0031.$$

Розрахунковий критерій Стюдента визначимо з формули:

$$t_{pi} = \frac{|b_i|}{S_{\beta}}; \quad (2.39)$$

де  $S_{\beta}$  - оцінки похибок коефіцієнтів  $b_i$ .

$$\begin{aligned}
 t_{pa0} &= \frac{1,105}{0,00316} = 375; & t_{pa4} &= \frac{0,0364}{0,00316} = 11,519; \\
 t_{pa1} &= \frac{0,00388}{0,00316} = 1,228; & t_{pa5} &= \frac{0,0266}{0,00316} = 8,418; \\
 t_{pa2} &= \frac{0,00538}{0,00316} = 1,703; & t_{pa6} &= \frac{0,00688}{0,00316} = 2,177; \\
 t_{pa3} &= \frac{0,00263}{0,00316} = 0,832; & t_{pa7} &= \frac{0,0269}{0,00316} = 8,513.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_{pb0} &= \frac{1,105}{0,0031} = 387,26; & t_{pb4} &= \frac{0,0364}{0,0031} = 11,742; \\
 t_{pb1} &= \frac{0,00388}{0,0031} = 1,252; & t_{pb5} &= \frac{0,0266}{0,0031} = 8,58; \\
 t_{pb2} &= \frac{0,00538}{0,0031} = 1,735; & t_{pb6} &= \frac{0,00688}{0,0031} = 2,219; \\
 t_{pb3} &= \frac{0,00263}{0,0031} = 0,848; & t_{pb7} &= \frac{0,0269}{0,0031} = 8,677.
 \end{aligned}$$

За таблицею при рівні значущості  $\alpha = 0,05$  та ступені свободи

$$f_1 = N(m - 1) = 8(10-1) = 72$$

$$t_T = 2.$$

Отже, коефіцієнти  $b_0, b_5, b_6, b_7, b_8$  є значущими, так як відповідно  $t_{pi} > t_T$ .

Запишемо рівняння регресії:

$$\hat{y} = 1,185 + 0,00388z_1 - 0,00538z_2 - 0,00263z_3 - 0,0364z_1z_2 - 0,0266z_1z_3 - 0,00688z_2z_3 - 0,0269z_1z_2z_3.$$

(2.40)

**Перевірка адекватності рівняння регресії за критерієм Фішера.**

$$\hat{y}_1 = 1,185 + 0,00388 + 0,00538 - 0,00263 + 0,0364 - 0,0266 + 0,00688 + 0,0269 = 1,09;$$

$$\hat{y}_2 = 1,185 - 0,00388 - 0,00538 + 0,00263 + 0,0364 - 0,0266 + 0,00688 - 0,0269 = 1,251;$$

$$\hat{y}_3 = 1,185 + 0,00388 - 0,00538 + 0,00263 - 0,0364 + 0,0266 + 0,00688 + 0,0269 = 1,229;$$

$$\hat{y}_4 = 1,185 + 0,00388 + 0,00538 + 0,00263 + 0,0364 + 0,0266 - 0,00688 - 0,0269 = 1,158;$$

$$\hat{y}_5 = 1,185 + 0,00388 - 0,00538 - 0,00263 - 0,0364 - 0,0266 - 0,00688 - 0,0269 = 1,215;$$

$$\hat{y}_6 = 1,185 - 0,00388 + 0,00538 + 0,00263 - 0,0364 - 0,0266 - 0,00688 + 0,0269 = 1,159;$$

$$\hat{y}_7 = 1,185 - 0,00388 - 0,00538 - 0,00263 + 0,0364 + 0,0266 - 0,00688 + 0,0269 = 1,22;$$

$$\hat{y}_8 = 1,185 - 0,00388 + 0,00538 - 0,00263 - 0,0364 + 0,0266 + 0,00688 - 0,0269 = 1,152.$$

Знайдемо дисперсію адекватності:

$$S_{ad}^2 = \sum_1^N \frac{(\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{N-d}; \quad (2.41)$$

де  $d$  - кількість значущих коефіцієнтів лінійного рівняння регресії,  
 $d = 4$ .

$$S_{ad1}^2 = \frac{(1,084 - 1,09)^2}{4} = 0,000009;$$

$$S_{ad2}^2 = \frac{(1,256 - 1,251)^2}{4} = 0,0000063;$$

$$S_{ad3}^2 = \frac{(1,235 - 1,229)^2}{4} = 0,000009;$$

$$S_{ad4}^2 = \frac{(1,154 - 1,158)^2}{4} = 0,000004;$$

$$S_{ad5}^2 = \frac{(1,21 - 1,215)^2}{4} = 0,0000063;$$

$$S_{ad6}^2 = \frac{(1,168 - 1,159)^2}{4} = 0,0000203;$$

$$S_{nd7}^2 = \frac{(1,226 - 1,22)^2}{4} = 0,000009;$$

$$S_{nd8}^2 = \frac{(1,146 - 1,152)^2}{4} = 0,000009.$$

$$S_{nd}^2 = 0,000009 + 0,0000063 + 0,000009 + 0,000004 + 0,0000063 + 0,0000203 + 0,000009 + 0,000009 = 0,0000729.$$

Визначимо критерій Фішера:

$$F_{\text{ф}} = \frac{S_{\text{нд}}^2}{S_{\text{н}}^2}; \quad (2.42)$$

$$F_{\text{па}} = \frac{0.0000729}{0.00000797} = 0.91; \quad F_{\text{пв}} = \frac{0.0000729}{0.0000769} = 0.95.$$

Ступені вільності:

$$f_1 = N - d = 8 - 4 = 4; \quad f_2 = N(m - 1) = 8(10 - 1) = 72. \quad (2.43)$$

З таблиць знаходимо критичне значення критерію Фішера при рівні значущості  $\alpha = 0,05$

$$F_{\text{кр}} = 2,29.$$

Обидва розрахункові критерії Фішера менші за критичне значення

( $F_{\text{па}} < F_{\text{кр}}, F_{\text{пв}} < F_{\text{кр}}$ ), тому гіпотеза про адекватність рівняння регресії приймається.

Замінімо в рівнянні регресії кодовані змінні  $z_i$  на натуральні  $x_i$ :

$$z_i = \frac{x_i - x_{0i}}{\Delta x_i},$$

$$z_1 = \frac{\lambda - 0,17}{0,01}; \quad z_2 = \frac{\delta - 0,001}{0,0001}; \quad z_3 = \frac{\tau - 30}{2}.$$

$$y = b_0 + b_1 \frac{q-1687}{100} + b_2 \frac{\delta_{\text{ст}}-0,0004}{0,0001} + b_3 \frac{\tau-0,0083}{0,0017} + b_4 \frac{(q-1687)(\delta_{\text{ст}}-0,0004)}{100 \cdot 0,0001} + b_5 \frac{(q-1687)(\tau-0,0083)}{100 \cdot 0,0017} + b_6 \frac{(\delta_{\text{ст}}-0,0004)(\tau-0,0083)}{0,0001 \cdot 0,0017} + b_7 \frac{(q-1687)(\delta_{\text{ст}}-0,0004)(\tau-0,0083)}{100 \cdot 0,0001 \cdot 0,0017};$$

$$y = 1.185 + 0.00388 \frac{\lambda-0,17}{0,01} - 0.00538 \frac{\delta-0,001}{0,0001} - 0,00263 \frac{\tau-30}{2} - 0.0364 \frac{(\lambda-0,17)(\delta-0,001)}{0,01 \cdot 0,0001} - 0.0266 \frac{(\lambda-0,17)(\tau-30)}{0,01 \cdot 2} - 0.00688 \frac{(\delta-0,001)(\tau-30)}{0,0001 \cdot 2} - 0.0269 \frac{(\lambda-0,17)(\delta-0,001)(\tau-30)}{0,01 \cdot 0,0001 \cdot 2};$$

$$\begin{aligned}
y &= 1.185 + 0.388(\lambda - 0,17) - 53,8(\delta - 0,001) - 0,00132(\tau - 30) - \\
&36400(\lambda\delta - 0,001\lambda - 0,17\delta + 0,00017) - 1,33(\lambda\tau - 30\lambda - 0,17\tau + 5,1) - \\
&34,4(\tau\delta - 30\delta - 0,001\tau + 0,03) - 0,0269(\lambda\delta - 0,001\lambda - 0,17\delta + \\
&0,00017)(\tau - 30) = 1.185 + 0.388\lambda - 0,066 - 53,8\delta + 0,0538 - 0,00132\tau + \\
&0,0396 - 36400\lambda\delta + 36,4\lambda + 6100\delta - 6,19 - 1,33\lambda\tau + 39,9\lambda + 0,226\tau - \\
&6,78 - 34,4\tau\delta + 1032\delta + 0,0344\tau - 1,032 - 0,0269\lambda\delta\tau + 0,807\lambda\delta + \\
&+ 0,0000269\lambda\tau - 0,000007\lambda + 0,0046\delta\tau - 0,137\delta - 0,00000457\tau + \\
&0,000137 = -12,79 + 76,69\lambda + 7166,06\delta + 0,259\tau - 36399,19\lambda\delta - \\
&1,33\lambda\tau - 34,4\delta\tau - 0,0269\lambda\delta\tau.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_1 &= -12,79 + 76,69 \cdot 0,18 + 7166,06 \cdot 0,0009 + 0,259 \cdot 32 - 36399,19 \cdot \\
&0,18 \cdot 0,0009 - 1,33 \cdot 0,18 \cdot 32 - 34,4 \cdot 0,0009 \cdot 32 - 0,0269 \cdot 0,18 \cdot 0,0009 \cdot \\
&32 = -12,79 + 13,8 + 6,5 + 8,28 - 5,9 - 7,67 - 0,991 - 0,00014 = 1,178;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_2 &= -12,79 + 76,69 \cdot 0,16 + 7166,06 \cdot 0,0011 + 0,259 \cdot 28 - 36399,19 \cdot \\
&0,16 \cdot 0,0011 - 1,33 \cdot 0,16 \cdot 28 - 34,4 \cdot 0,0011 \cdot 28 - 0,0269 \cdot 0,16 \cdot 0,0011 \cdot \\
&28 = -12,79 + 12,27 + 7,883 + 7,252 - 6,406 - 5,96 - 1,06 - 0,000133 = \\
&1,189;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_3 &= -12,79 + 76,69 \cdot 0,18 + 7166,06 \cdot 0,0011 + 0,259 \cdot 28 - 36399,19 \cdot \\
&0,18 \cdot 0,0011 - 1,33 \cdot 0,18 \cdot 28 - 34,4 \cdot 0,0011 \cdot 28 - 0,0269 \cdot 0,18 \cdot 0,0011 \cdot \\
&28 = -12,79 + 13,8 + 7,88 + 7,252 - 7,21 - 6,703 - 1,06 - 0,00015 = \\
&1,169;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_4 &= -12,79 + 76,69 \cdot 0,18 + 7166,06 \cdot 0,0009 + 0,259 \cdot 28 - 36399,19 \cdot \\
&0,18 \cdot 0,0009 - 1,33 \cdot 0,18 \cdot 28 - 34,4 \cdot 0,0009 \cdot 28 - 0,0269 \cdot 0,18 \cdot 0,0009 \cdot \\
&28 = -12,79 + 13,8 + 6,45 + 7,25 - 5,9 - 6,703 - 0,89 - 0,000122 = 1,217;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_5 &= -12,79 + 76,69 \cdot 0,18 + 7166,06 \cdot 0,0011 + 0,259 \cdot 32 - 36399,19 \cdot \\
&0,18 \cdot 0,0011 - 1,33 \cdot 0,18 \cdot 32 - 34,4 \cdot 0,0011 \cdot 32 - 0,0269 \cdot 0,18 \cdot 0,0011 \cdot \\
&32 = -12,79 + 13,88 + 7,88 + 8,28 - 7,21 - 7,67 - 1,21 - 0,00017 = 1,18;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_6 &= -12,79 + 76,69 \cdot 0,16 + 7166,06 \cdot 0,0009 + 0,259 \cdot 28 - 36399,19 \cdot \\
&0,16 \cdot 0,0009 - 1,33 \cdot 0,16 \cdot 28 - 34,4 \cdot 0,0009 \cdot 28 - 0,0269 \cdot 0,16 \cdot 0,0009 \cdot \\
&28 = -12,79 + 12,27 + 6,45 + 7,252 - 5,24 - 5,96 - 0,87 - 0,00011 = \\
&1,112;
\end{aligned}$$

$$y_7 = -12,79 + 76,69 \cdot 0,16 + 7166,06 \cdot 0,0011 + 0,259 \cdot 32 - 36399,19 \cdot 0,16 \cdot 0,0011 - 1,33 \cdot 0,16 \cdot 32 - 34,4 \cdot 0,0011 \cdot 32 - 0,0269 \cdot 0,16 \cdot 0,0011 \cdot 32 = -12,79 + 12,27 + 7,88 + 8,28 - 6,406 - 6,81 - 1,21 - 0,00015 = 1,214;$$

$$y_8 = -12,79 + 76,69 \cdot 0,16 + 7166,06 \cdot 0,0009 + 0,259 \cdot 32 - 36399,19 \cdot 0,16 \cdot 0,0009 - 1,33 \cdot 0,16 \cdot 32 - 34,4 \cdot 0,0009 \cdot 32 - 0,0269 \cdot 0,16 \cdot 0,0009 \cdot 32 = -12,79 + 12,27 + 6,45 + 8,28 - 5,24 - 6,81 - 0,99 - 0,00012 = 1,169.$$

Знайдемо похибку обчислень за формулою:

$$\varepsilon_j = \frac{|\bar{y}_j - y_j|}{y_j} \cdot 100\%; \quad (2.44)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{|1,004 - 1,170|}{1,004} \cdot 100 = 8,67\%;$$

$$\varepsilon_2 = \frac{|1,256 - 1,189|}{1,256} \cdot 100 = 5,33\%;$$

$$\varepsilon_3 = \frac{|1,235 - 1,169|}{1,235} \cdot 100 = 5,34\%;$$

$$\varepsilon_4 = \frac{|1,154 - 1,217|}{1,154} \cdot 100 = 5,46\%;$$

$$\varepsilon_5 = \frac{|1,21 - 1,18|}{1,21} \cdot 100 = 2,48\%;$$

$$\varepsilon_6 = \frac{|1,168 - 1,112|}{1,168} \cdot 100 = 4,8\%;$$

$$\varepsilon_7 = \frac{|1,226 - 1,214|}{1,226} \cdot 100 = 0,98\%;$$

$$\varepsilon_8 = \frac{|1,146 - 1,169|}{1,146} \cdot 100 = 2\%.$$

Визначимо середню похибку:

$$\varepsilon = \frac{\sum_1^N \varepsilon_j}{N} = \frac{8,67 + 5,33 + 5,34 + 5,46 + 2,48 + 4,8 + 0,98 + 2}{8} = 4,38\%.$$

**Висновок.** Отримане значення похибки менше допустимого і дана математично-статистична модель є адекватною.

## 2.2.Методика проведення експериментальних досліджень.

При проведенні експериментальних досліджень було використано зразки розмірами 15x150 мм з ПП товщиною 1,1 мм, ПС товщиною 1,1 мм, ПС товщиною 0,7 мм, ПЕ товщиною 0,8 мм, ПЕ товщиною 0,5 мм.

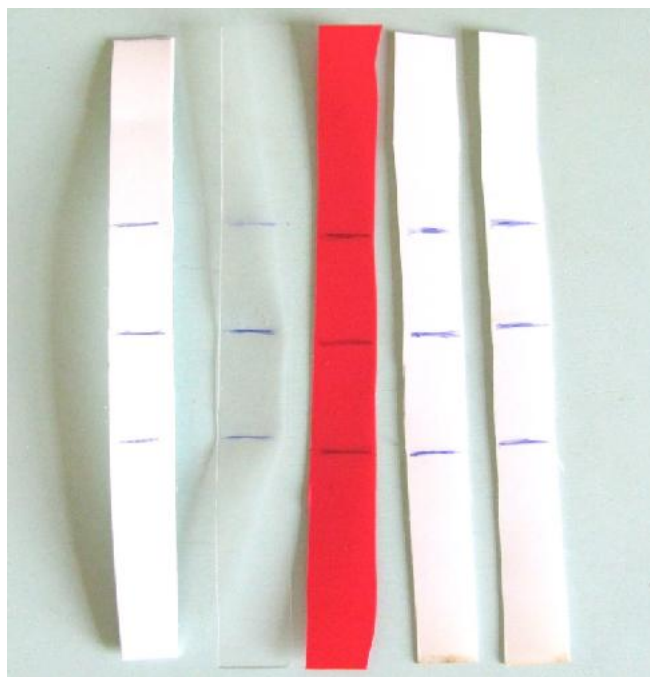


Рис.2.6. Зразки з ПП, ПЕ, ПС.

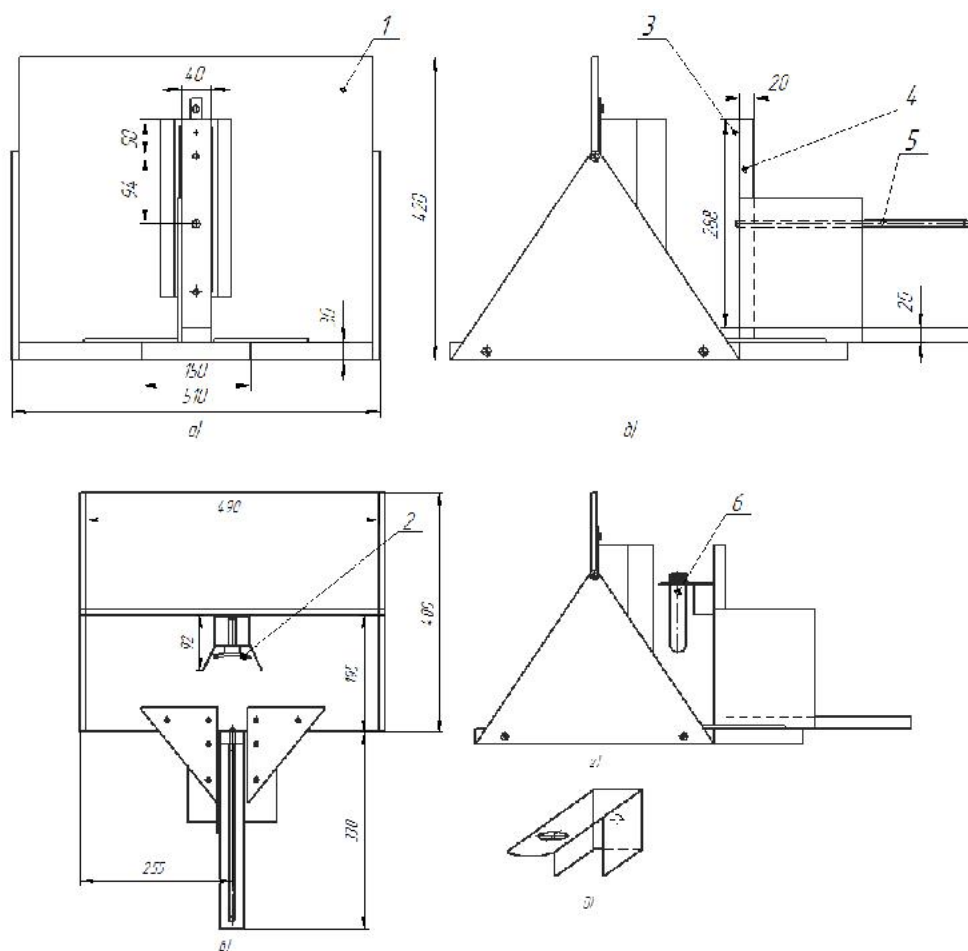
Досліди проводились на установці, зображеній на рис.2.7.





**Рис.2.7.** Установка для проведення експериментів: а)варіант для нагрівання плоских зразків; б)варіант для нагрівання преформ, вид зверху.

Схематично дана установка представлена на рис.2.8.

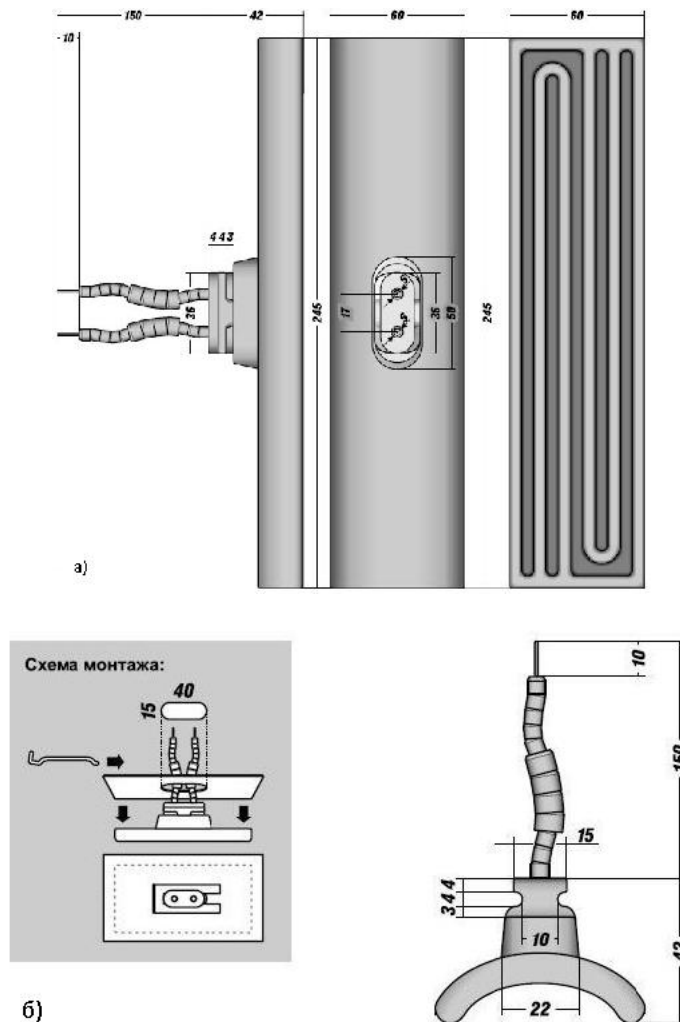


**Рис.2.8.** Схема експериментальної установки: а)вид спереду; б)вид збоку; в)вид зверху; г)варіант установки для нагрівання преформ; д)утримувач преформ.

1 – корпус, 2 – інфрачервоний випромінювач, 3 – місце кріплення зразка, 4 – опора, 5 – термометр, 6 – преформа.

Слід зазначити, що для попередження нагрівання та руйнування опори та утримувача преформ вони обгорталися фольгою.

На рис.2.9 показано креслення інфрачервоного випромінювача, який застосовувався в експериментальній установці.



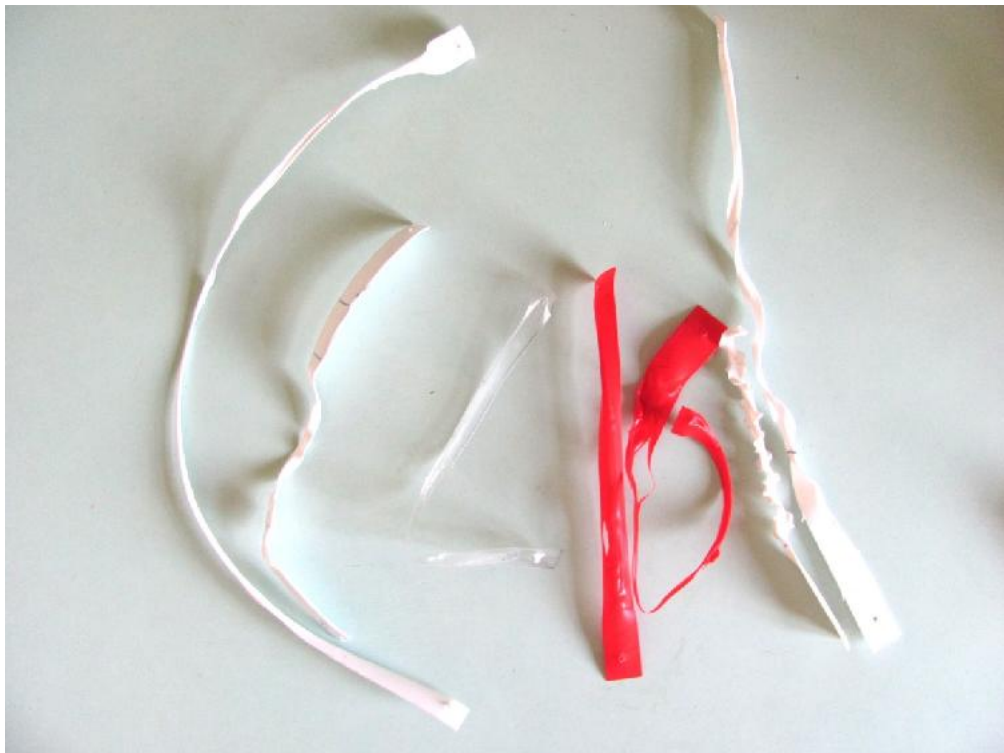
**Рис.2.9.** Інфрачервоний випромінювач марки ECS1 фірми Elser потужністю 650 Вт: а)випромінювач ECS1; б)схема монтажу.

Експеримент проводився наступним чином: на зразку з двома отворами зверху та знизу для кріплення відмічалась робоча зона (50 мм посередині зразка), далі він закріплювався на опорі, нагрівався і до нього прикладалось певне навантаження шляхом розміщення знизу зразка елементів з відповідною масою. Змінюючи такі параметри, як відстань від нагрівача до матеріала, час та температура нагрівання, розміри, товщина,

колір та матеріал зразка; величина навантаження ми отримували значення товщини та ширини, величину відносного видовження деформованого зразка. Температура в процесі нагрівання фіксувалася за допомогою скляних ртутних термометрів зі шкалою 1...100 °С (ГОСТ 400-80) та 1...250 °С (ГОСТ 215-73). Приклади зразків після нагрівання показані на рис.2.11.

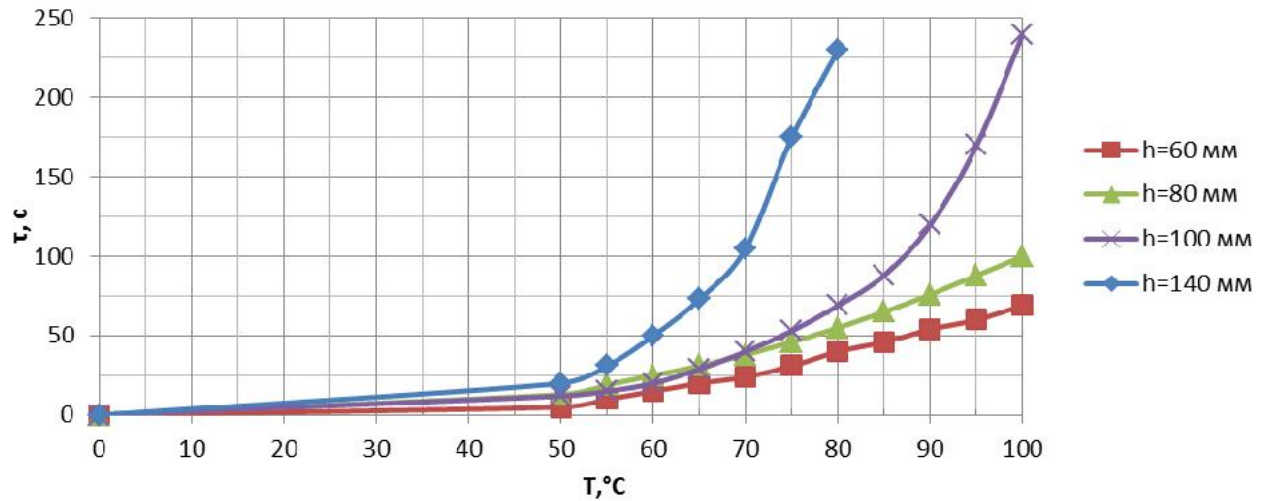


**Рис.2.10.** Елементи, масою 0,2; 0,5; 1 та 2 кг, що використовувались для прикладання навантаження.



**Рис.2.11.** Деформовані зразки.

### 2.3.Результати проведених експериментальних досліджень.

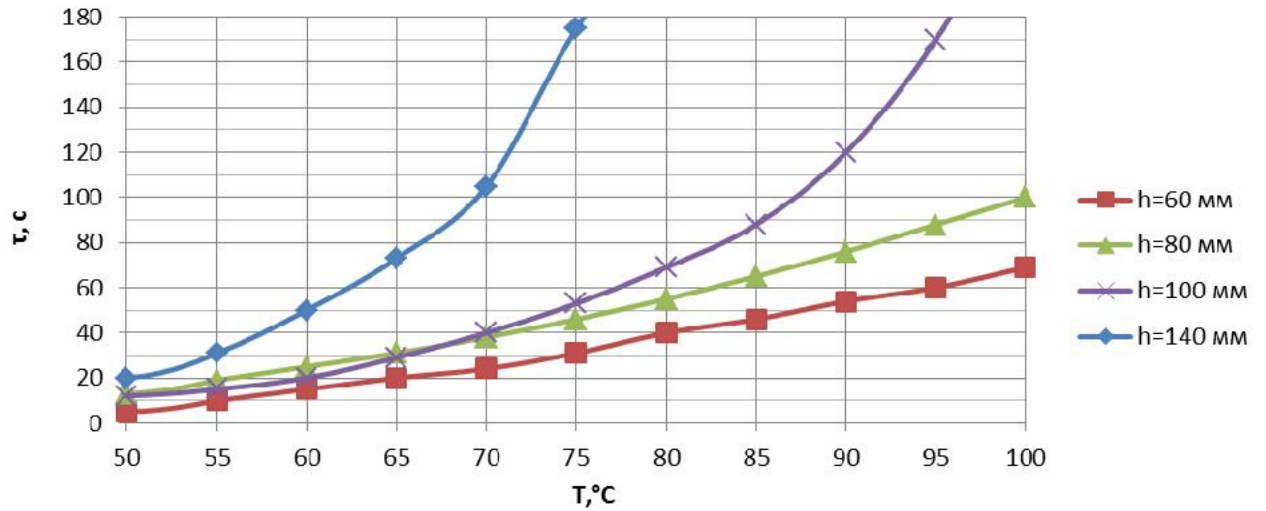


**Рис.2.12.** Залежність температури нагрівання зразка з ПП товщиною 1,1 мм від часу нагрівання.

Так як до  $50\text{ }^\circ\text{C}$  залежності виглядають подібно, то для наступних двох графіків відлік температури починається саме з  $50\text{ }^\circ\text{C}$ .

Таблиця 2.4.

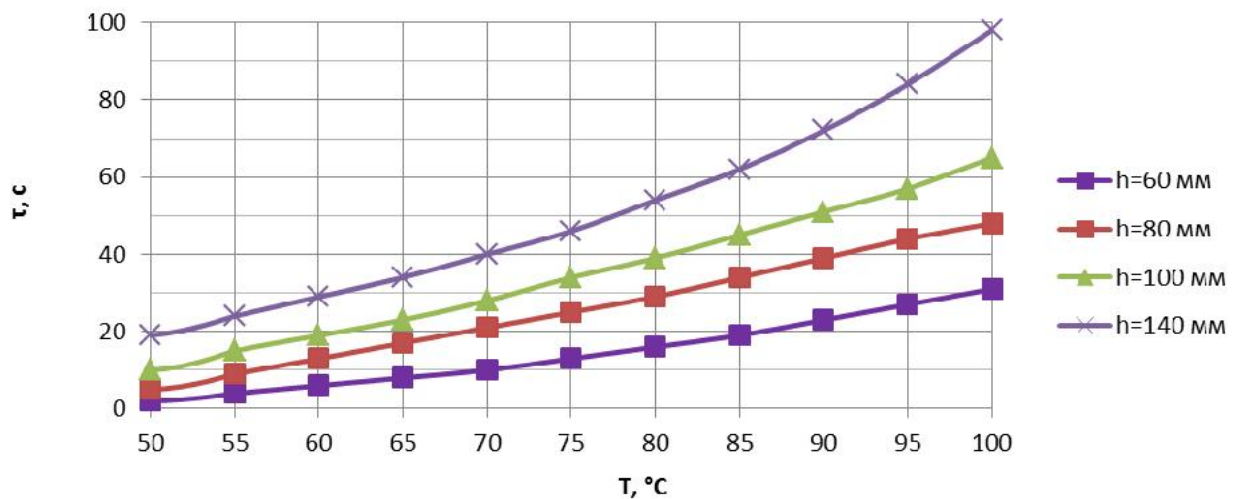
$T, ^\circ\text{C}$	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$\tau, \text{с}$											
при $h=60$ мм	5	10	15	20	24	31	40	46	54	60	69
при $h=80$ мм	13	19	25	31	38	46	56	65	76	88	100
при $h=100$ мм	12	15	20	29	40	53	69	88	120	170	240
при $h=140$ мм	20	31	50	73	105	175	230	290			



**Рис.2.13.** Залежність температури нагрівання зразка з ПС товщиною 1,1 мм від часу нагрівання.

Таблиця 2.5

T, °C \ τ, c	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
при h=60 мм	3	6	9	13	15	18	22	27	32	35	40
при h=80 мм	8	14	20	25	30	34	40	46	50	54	59
при h=100 мм	15	21	29	35	42	49	55	62	68	73	80
при h=140 мм	26	31	37	45	52	58	68	76	89	104	125



**Рис.2.14.** Залежність температури нагрівання зразка з ПС товщиною 0,7 мм від часу нагрівання.

Таблиця 2.6

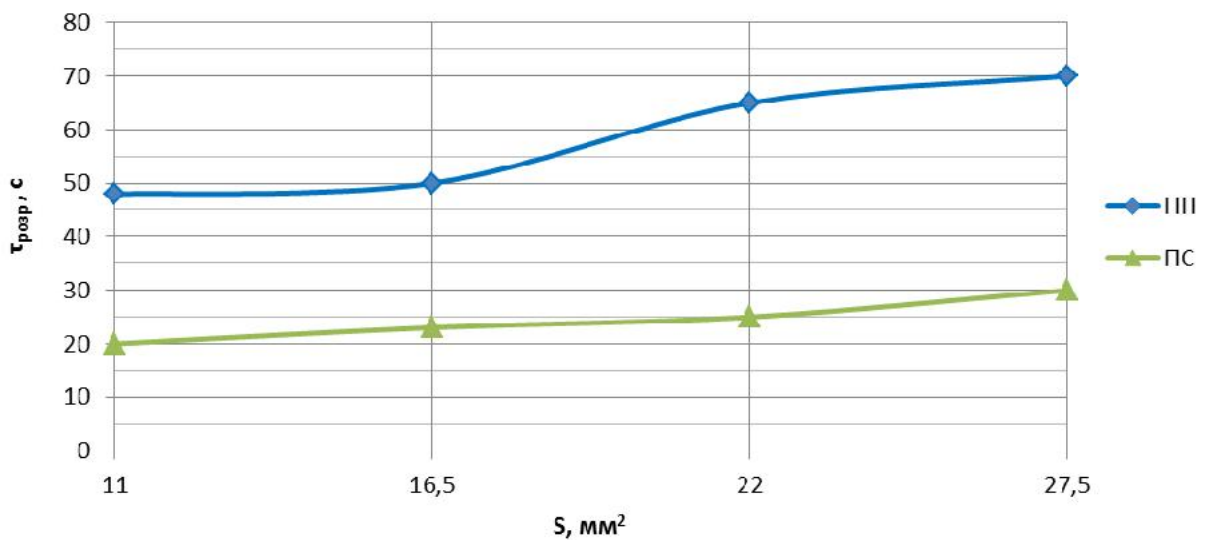
$T, ^\circ\text{C}$	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$\tau, \text{с}$											
при $h=60 \text{ мм}$	2	4	6	8	10	13	16	19	23	27	31
при $h=80 \text{ мм}$	5	9	13	17	21	25	29	34	39	44	48
при $h=100 \text{ мм}$	10	15	19	23	28	34	39	45	51	57	65
при $h=140 \text{ мм}$	19	24	29	34	40	46	54	62	72	84	98

Відповідно на рис.2.15 та рис.2.16 площа поперечного перерізу зразка розраховується з формули,  $\text{мм}^2$ :

$$S = b \cdot \delta, \quad (2.45)$$

де  $b$  - ширина зразка (приймаємо 10 мм, 15 мм, 20 мм, 25 мм);

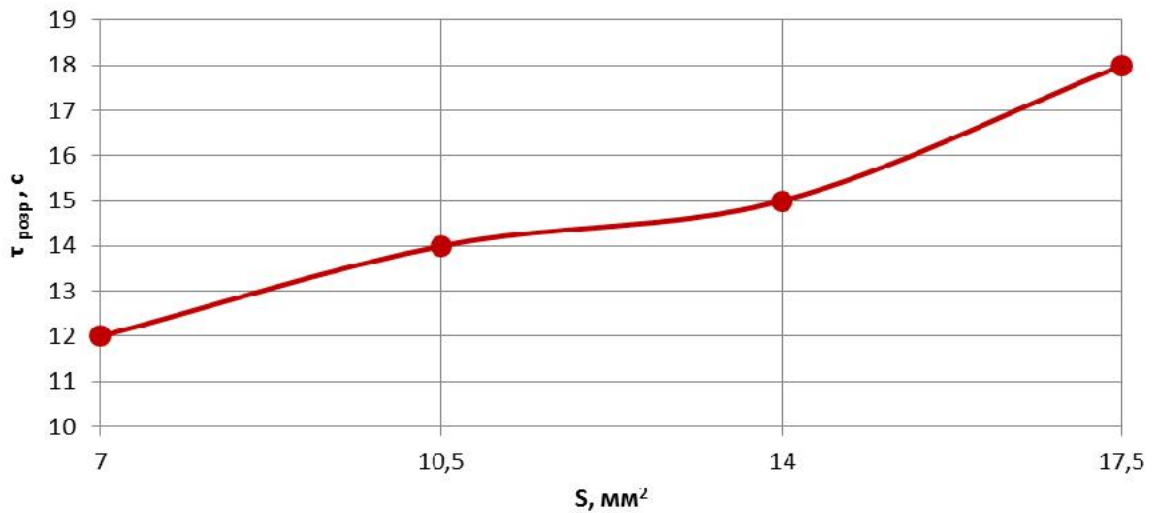
$\delta$  - товщина зразка, мм.



**Рис.2.15.** Залежність часу нагрівання зразків з ПП товщиною 1,1 мм та ПС товщиною 1,1 мм від площі поперечного перерізу зразка при відстані нагрівача до матеріала 100 мм та прикладанні навантаження 10 Н.

Таблиця 2.7

$S, \text{мм}^2$	11	16,5	22	27,5
$\tau_{\text{розр ПП}}, \text{с}$	48	50	65	70
$\tau_{\text{розр ПС}}, \text{с}$	20	23	25	30



**Рис.2.16.** Залежність часу нагрівання зразка з ПС товщиною 0,7 мм від площі поперечного перерізу зразка при відстані нагрівача до матеріала 100 мм та прикладанні навантаження 10 Н.

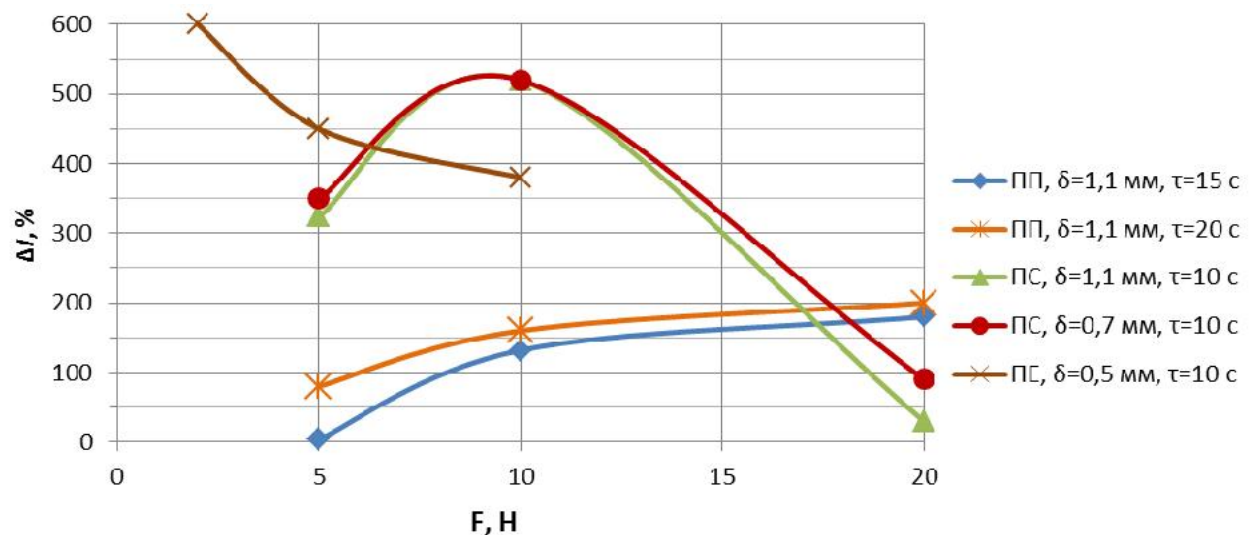
Таблиця 2.8

S, мм <sup>2</sup>	7	10,5	14	17,5
τ <sub>розгр</sub> ПС, с	12	14	15	18

Величина відносного видовження розраховується з формули

$$\Delta l = \frac{l_2 - l_1}{l_1} \cdot 100\%, \quad (2.46)$$

де  $l_1, l_2$  - відповідно початкова та кінцева довжина зразка, мм.



**Рис.2.17.** Залежність величини відносного видовження зразків від величини прикладеного навантаження при відстані нагрівача до матеріала 60 мм.

Таблиця 2.9

$\Delta l, \%$ \ / \ $F, \text{H}$	5	10	20
ПП, $\delta=1,1 \text{ мм}, \tau=15 \text{ с}$	4	132	180
ПП, $\delta=1,1 \text{ мм}, \tau=20 \text{ с}$	80	160	200
ПС, $\delta=1,1 \text{ мм}, \tau=10 \text{ с}$	324	520	30
ПС, $\delta=0,7 \text{ мм}, \tau=10 \text{ с}$	350	520	90
ПЕ, $\delta=0,5 \text{ мм}, \tau=10 \text{ с}$	450	380	

Напруження визначається за формулою, МПа:

$$\sigma = \frac{F}{S}, \quad (2.47)$$

де  $F$  - прикладене навантаження, Н;

$S$  - площа поперечного перерізу зразка,  $\text{м}^2$ .

Для ПП:

$$\sigma_1 = \frac{0}{1,1 \cdot 10^{-6}} = 0, \quad \sigma_2 = \frac{10}{10 \cdot 0,0 \cdot 10^{-6}} = 1,25 \text{ МПа}, \quad \sigma_3 = \frac{10}{6 \cdot 0,7 \cdot 10^{-6}} = 2,38 \text{ МПа},$$

$$\sigma_4 = \frac{10}{5 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6}} = 3,33 \text{ МПа}, \quad \sigma_5 = \frac{10}{5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} = 4 \text{ МПа}.$$

Для ПС товщиною 1,1 мм:

$$\sigma_1 = 0, \quad \sigma_2 = \frac{10}{11 \cdot 0,0 \cdot 10^{-6}} = 1,14 \text{ МПа}, \quad \sigma_3 = \frac{10}{10 \cdot 0,7 \cdot 10^{-6}} = 1,43 \text{ МПа},$$

$$\sigma_4 = \frac{10}{8 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6}} = 2,08 \text{ МПа}, \quad \sigma_5 = \frac{10}{5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} = 4 \text{ МПа}.$$

Для ПС товщиною 0,7 мм:

$$\sigma_1 = 0, \quad \sigma_2 = \frac{10}{7 \cdot 0,4 \cdot 10^{-6}} = 3,57 \text{ МПа}, \quad \sigma_3 = \frac{10}{7 \cdot 0,3 \cdot 10^{-6}} = 4,76 \text{ МПа},$$

$$\sigma_4 = \frac{10}{6,5 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}} = 7,69 \text{ МПа}, \quad \sigma_5 = \frac{10}{5 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}} = 8,33 \text{ МПа}.$$

Для ПЕ товщиною 0,8 мм:

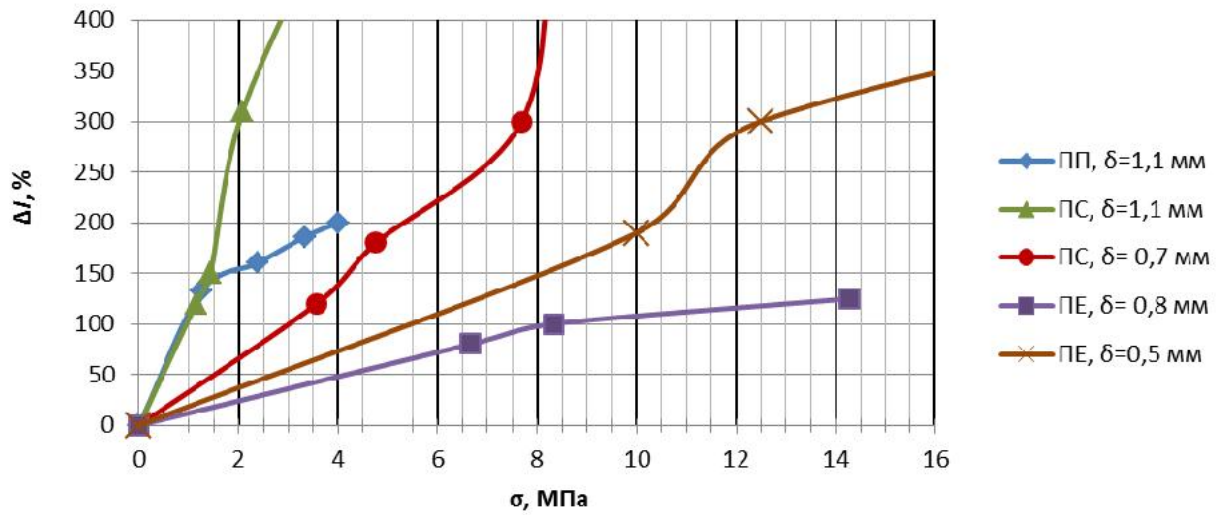
$$\sigma_1 = 0, \quad \sigma_2 = \frac{10}{3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}} = 6,66 \text{ МПа}, \quad \sigma_3 = \frac{10}{3 \cdot 0,4 \cdot 10^{-6}} = 8,33 \text{ МПа},$$

$$\sigma_4 = \frac{10}{2,5 \cdot 0,3 \cdot 10^{-6}} = 14,29 \text{ МПа}.$$

Для ПЕ товщиною 0,5 мм:

$$\sigma_1 = 0, \quad \sigma_2 = \frac{10}{5 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}} = 10 \text{ МПа}, \quad \sigma_3 = \frac{10}{4,4 \cdot 0,2 \cdot 10^{-6}} = 12,5 \text{ МПа},$$

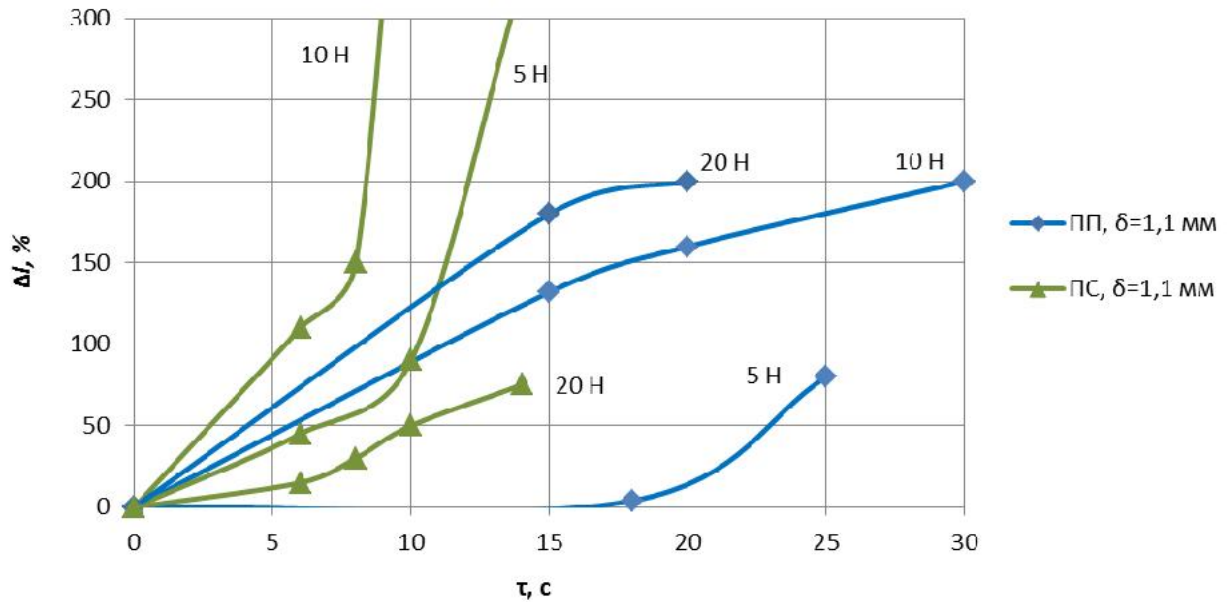
$$\sigma_4 = \frac{10}{4 \cdot 0,1 \cdot 10} \sigma = 25 \text{ МПа.}$$



**Рис.2.18.** Залежність величини відносного видовження зразків від напруження при відстані нагрівача до матеріала 60 мм.

Таблиця 2.10

ПП, δ=1,1мм	σ, МПа	1,25	2,38	3,33	4
	Δl, %	132	160	186	200
ПС, δ=1,1мм	σ, МПа	1,14	1,43	2,08	4
	Δl, %	120	150	310	520
ПС, δ=0,7мм	σ, МПа	3,57	4,76	7,69	8,33
	Δl, %	120	180	300	520
ПЕ, δ=0,8мм	σ, МПа	6,66	8,33	14,29	
	Δl, %	80	100	125	
ПЕ, δ=0,5мм	σ, МПа	10	12,5	25	
	Δl, %	190	300	450	

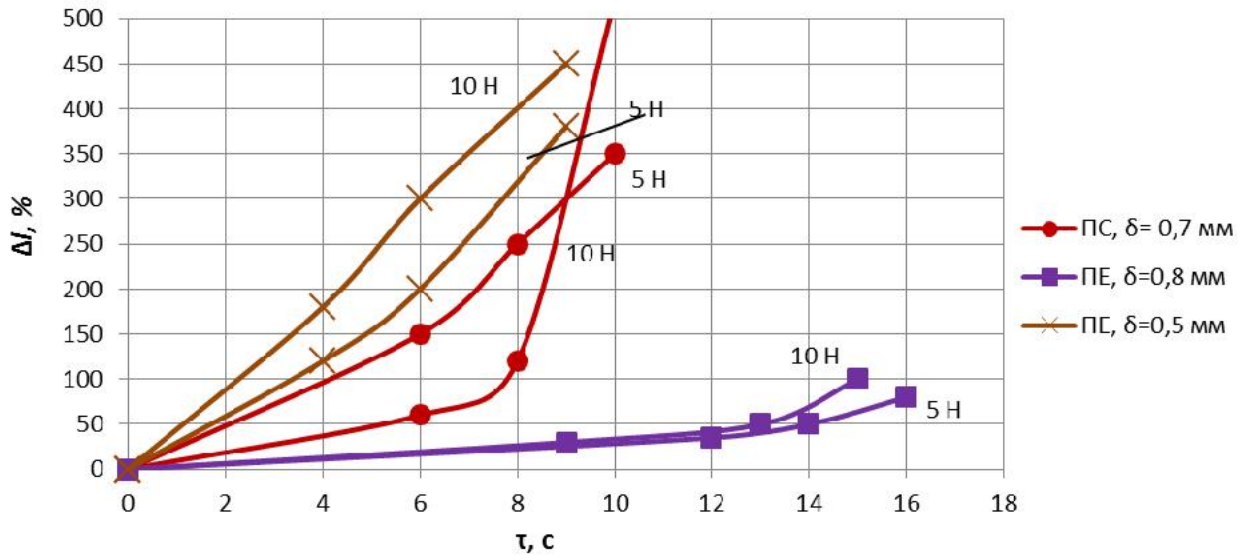


**Рис.2.19.** Залежність величини відносного видовження зразків товщиною 1,1 мм від часу нагрівання за прикладання навантаження величиною 5Н, 10Н, 20Н на відстані від нагрівача до матеріала 60 мм.

Таблиця 2.11

ПП	5 Н	$\tau, \text{с}$	12	25	
		$\Delta l, \%$	4	80	
	10 Н	$\tau, \text{с}$	15	20	30
		$\Delta l, \%$	132	160	200
	20 Н	$\tau, \text{с}$	15	20	
		$\Delta l, \%$	180	200	
ПС	5 Н	$\tau, \text{с}$	6	10	14
		$\Delta l, \%$	45	90	324
	10 Н	$\tau, \text{с}$	6	8	10
		$\Delta l, \%$	110	150	520
	20 Н	$\tau, \text{с}$	6	8	10
		$\Delta l, \%$	15	30	50

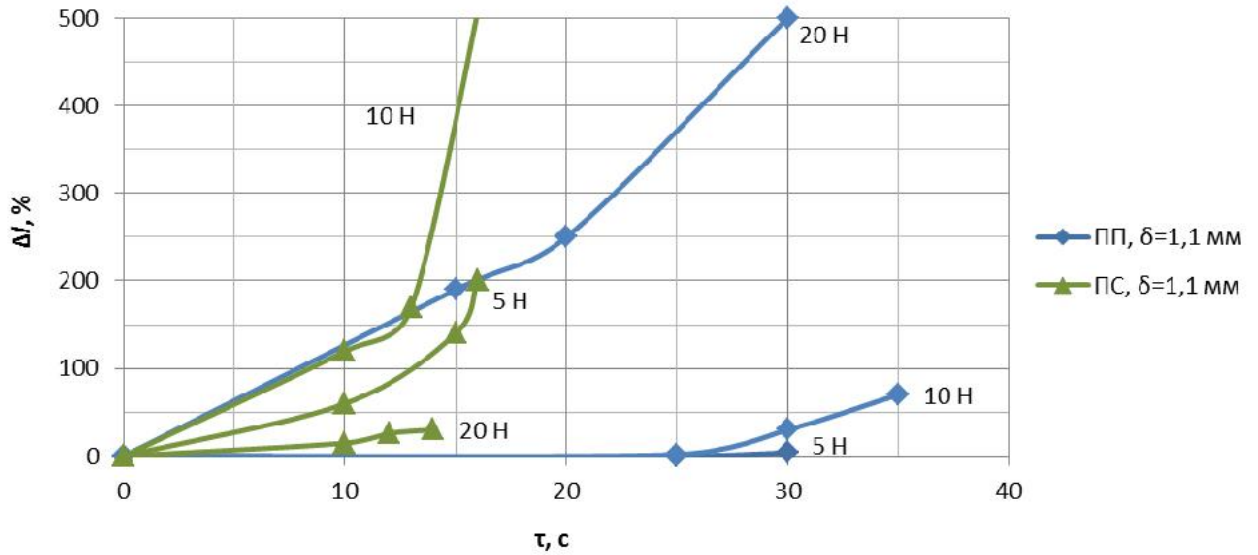
При прикладанні навантаження величиною 20 Н зразки з ПС товщиною 0,7 мм та з ПЕ руйнуються майже відразу, тому на рис.2.20, рис.2.22, рис.2.24 присутні криві лише для навантажень 5 Н та 10 Н.



**Рис.2.20.** Залежність величини відносного видовження від часу нагрівання за прикладання навантаження величиною 5Н, 10Н на відстані від нагрівача до матеріала 60 мм.

Таблиця 2.12

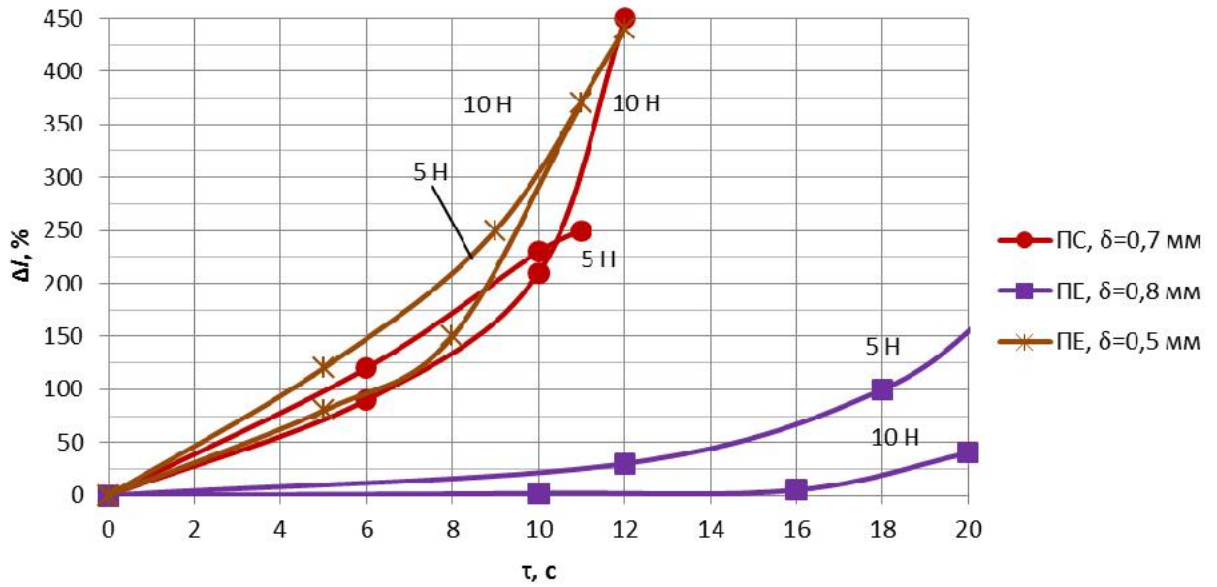
ПС, δ=0,7мм	5 Н	τ, с	6	8	10
		Δl, %	150	250	300
	10 Н	τ, с	6	8	10
		Δl, %	60	120	520
ПЕ, δ=0,8мм	5 Н	τ, с	12	14	16
		Δl, %	35	50	80
	10 Н	τ, с	9	13	15
		Δl, %	30	50	100
ПЕ, δ=0,5мм	5 Н	τ, с	4	6	9
		Δl, %	120	200	380
	10 Н	τ, с	4	6	9
		Δl, %	180	300	450



**Рис.2.21.** Залежність величини відносного видовження зразків товщиною 1,1 мм від часу нагрівання за прикладання навантаження величиною 5Н, 10Н, 20Н на відстані від нагрівача до матеріала 80 мм.

Таблиця 2.13

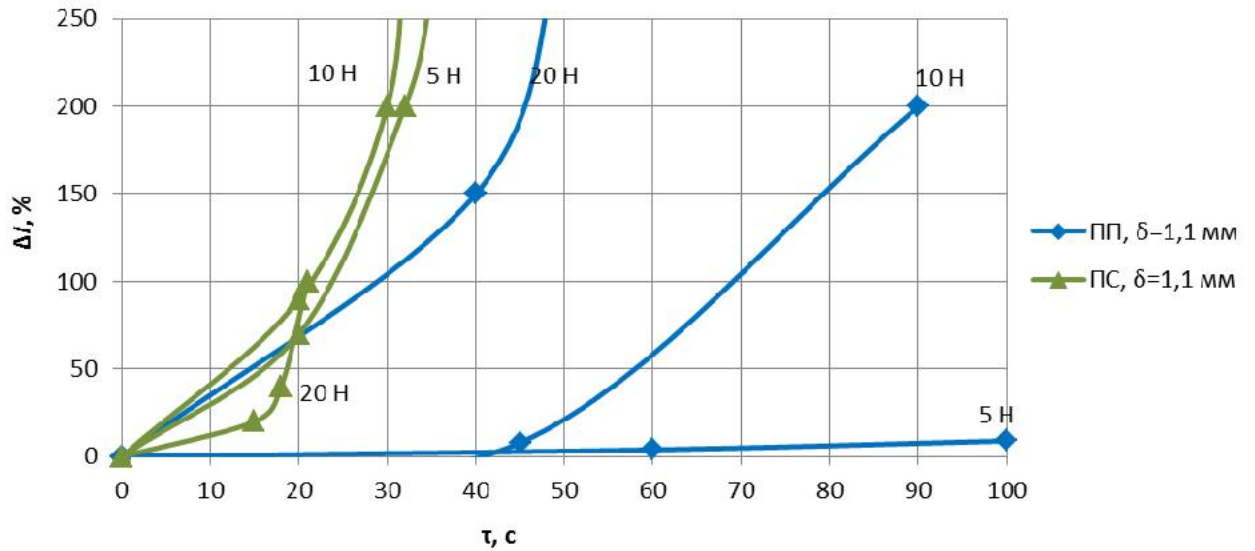
ПП	5 Н	τ, с	25	30	
		Δ l, %	0	4	
	10 Н	τ, с	25	30	35
		Δ l, %	2	30	70
	20 Н	τ, с	15	20	30
		Δ l, %	190	250	500
ПС	5 Н	τ, с	10	15	16
		Δ l, %	60	140	200
	10 Н	τ, с	10	13	17
		Δ l, %	120	170	630
	20 Н	τ, с	10	12	14
		Δ l, %	15	26	30



**Рис.2.22.** Залежність величини відносного видовження від часу нагрівання за прикладання навантаження величиною 5Н, 10Н на відстані від нагрівача до матеріала 80 мм.

Таблиця 2.14

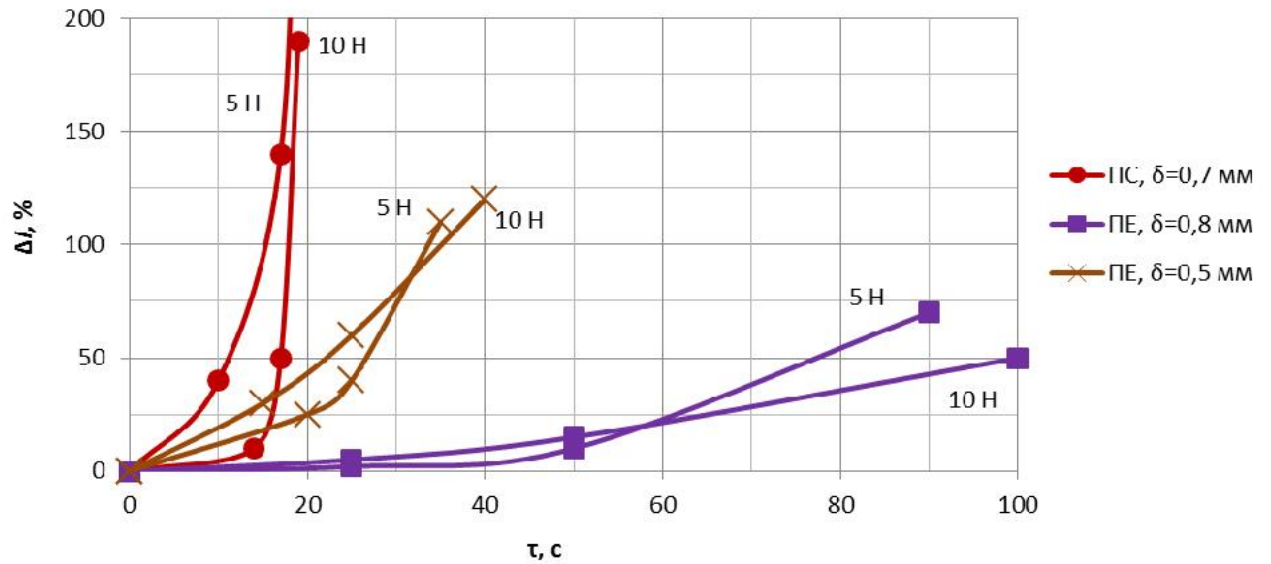
ПС, δ=0,7мм	5 Н	τ, с	6	10	11
		Δ l, %	120	230	250
	10 Н	τ, с	6	10	12
		Δ l, %	90	210	450
ПЕ, δ=0,8мм	5 Н	τ, с	12	18	21
		Δ l, %	30	100	190
	10 Н	τ, с	10	16	20
		Δ l, %	2	5	40
ПЕ, δ=0,5мм	5 Н	τ, с	5	8	11
		Δ l, %	80	150	250
	10 Н	τ, с	5	9	12
		Δ l, %	120	250	440



**Рис.2.23.** Залежність величини відносного видовження зразків товщиною 1,1 мм від часу нагрівання за прикладання навантаження величиною 5Н, 10Н, 20Н на відстані від нагрівача до матеріала 120 мм.

Таблиця 2.15

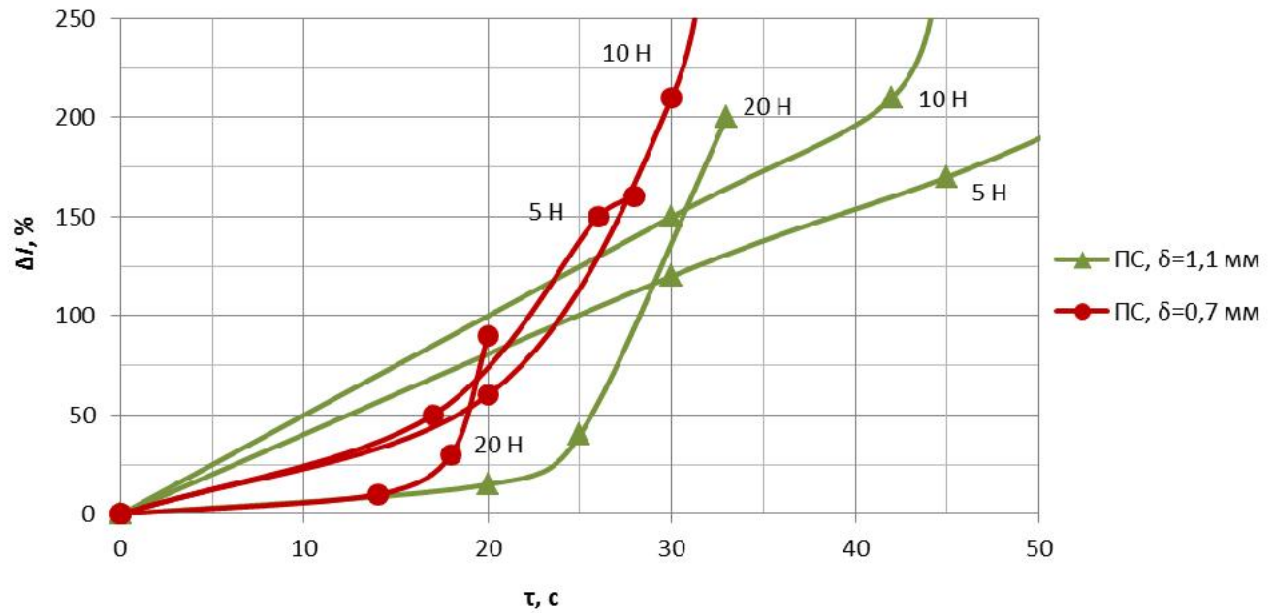
ПП	5 Н	τ, с	60	100	
		Δ l, %	4	9	
	10 Н	τ, с	45	90	
		Δ l, %	8	200	
	20 Н	τ, с	40	50	
		Δ l, %	150	300	
ПС	5 Н	τ, с	20	32	35
		Δ l, %	70	200	264
	10 Н	τ, с	20	30	32
		Δ l, %	90	200	310
	20 Н	τ, с	15	18	21
		Δ l, %	20	40	100



**Рис.2.24.** Залежність величини відносного видовження від часу нагрівання за прикладання навантаження величиною 5Н, 10Н на відстані від нагрівача до матеріала 120 мм.

Таблиця 2.16

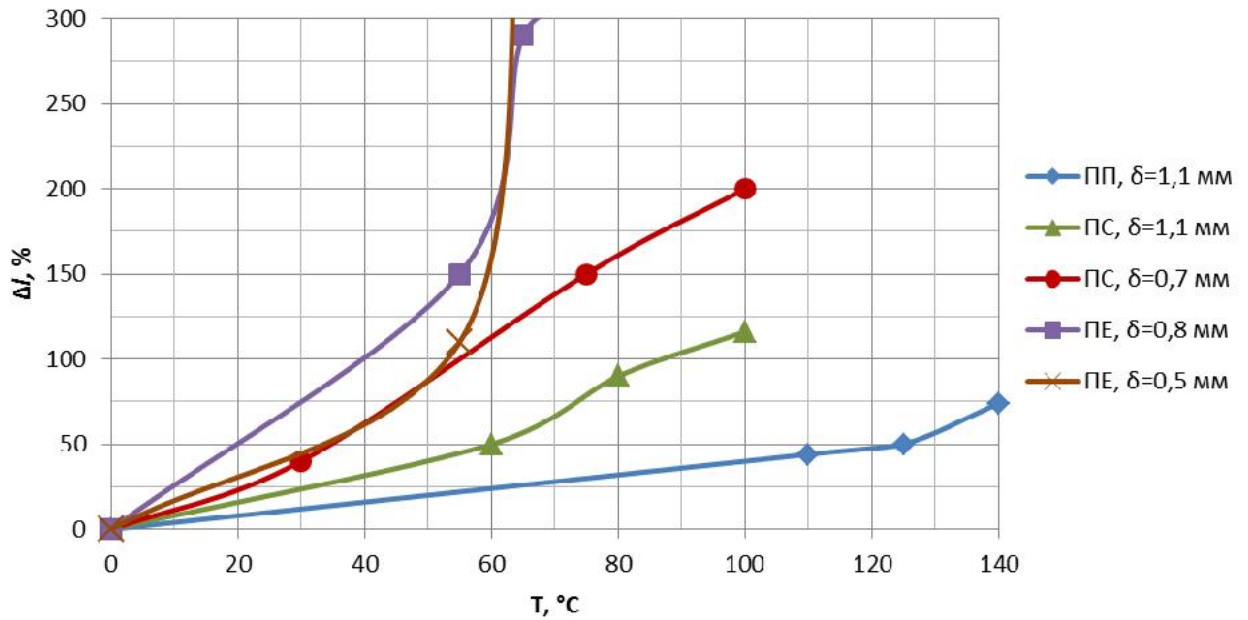
ПС, $\delta=0,7\text{мм}$	5 Н	$\tau, \text{c}$	10	17	19
		$\Delta l, \%$	40	140	340
	10 Н	$\tau, \text{c}$	14	17	19
		$\Delta l, \%$	10	50	190
ПЕ, $\delta=0,8\text{мм}$	5 Н	$\tau, \text{c}$	25	50	90
		$\Delta l, \%$	2	10	70
	10 Н	$\tau, \text{c}$	25	50	100
		$\Delta l, \%$	5	15	50
ПЕ, $\delta=0,5\text{мм}$	5 Н	$\tau, \text{c}$	20	25	35
		$\Delta l, \%$	25	40	110
	10 Н	$\tau, \text{c}$	15	25	40
		$\Delta l, \%$	30	60	120



**Рис.2.25.** Залежність величини відносного видовження зразків товщиною 1,1 мм від часу нагрівання за прикладання навантаження величиною 5Н, 10Н, 20Н на відстані від нагрівача до матеріала 140 мм.

Таблиця 2.17

ПС, $\delta=1,1$ мм	5 Н	$\tau, c$	30	45	55
		$\Delta l, \%$	120	170	210
	10 Н	$\tau, c$	30	42	45
		$\Delta l, \%$	150	210	290
	20 Н	$\tau, c$	20	25	33
		$\Delta l, \%$	15	40	200
ПС, $\delta=0,7$ мм	5 Н	$\tau, c$	17	26	28
		$\Delta l, \%$	50	150	160
	10 Н	$\tau, c$	20	30	32
		$\Delta l, \%$	60	210	320
	20 Н	$\tau, c$	14	18	20
		$\Delta l, \%$	10	30	90

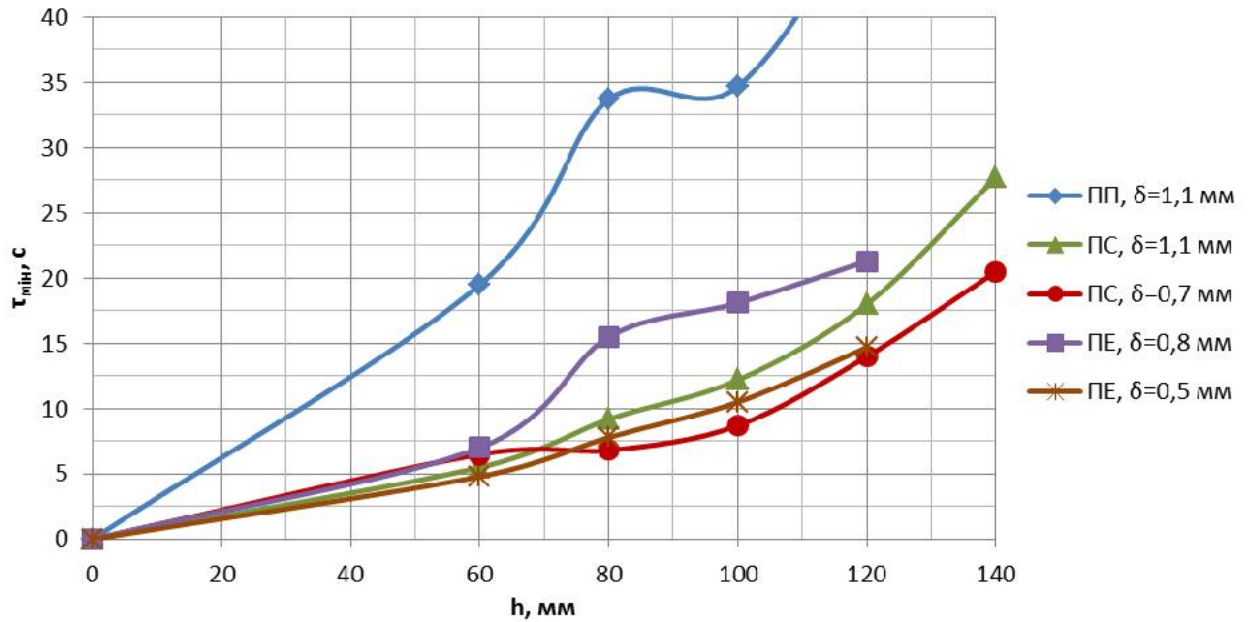


**Рис.2.26.** Залежність величини відносного видовження зразків від температури нагрівання з прикладанням навантаження 5 Н.

Таблиця 2.18

ПП, δ=1,1мм	T, °C	110	125	140
	Δ l, %	44	50	74
ПС, δ=1,1мм	T, °C	60	80	100
	Δ l, %	50	90	116
ПС, δ=0,7мм	T, °C	30	75	100
	Δ l, %	40	150	200
ПЕ, δ=0,8мм	T, °C	55	65	75
	Δ l, %	150	290	310
ПЕ, δ=0,5мм	T, °C	55	65	75
	Δ l, %	110	380	440

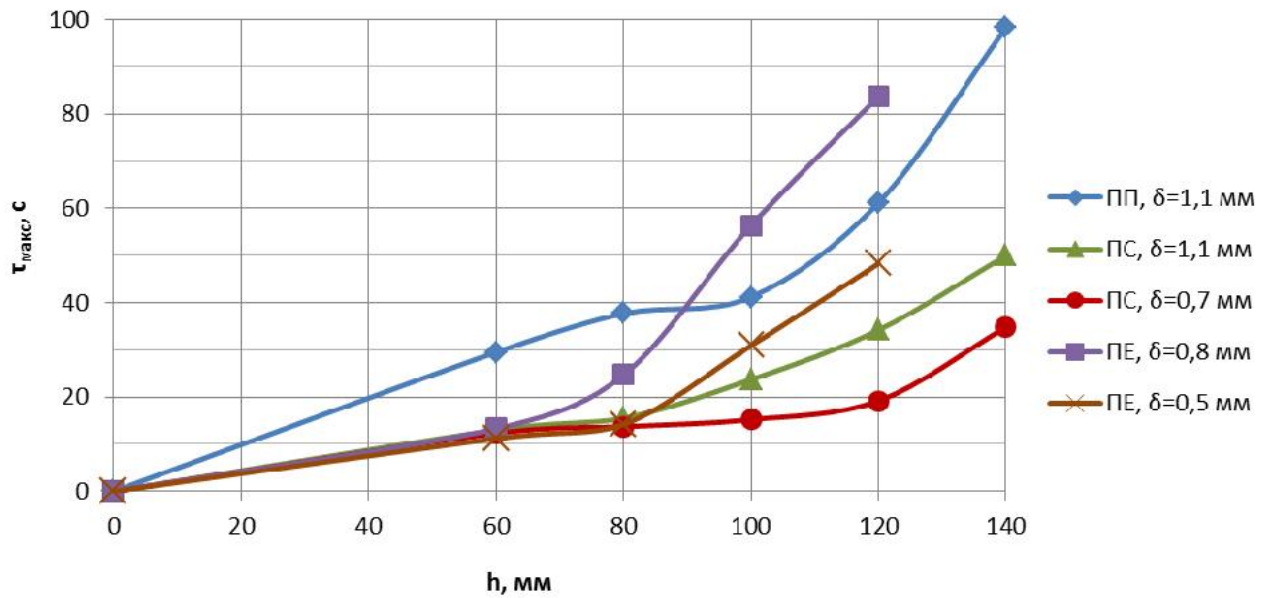
На рис.2.27 та рис.2.28 мінімальному часу нагрівання зразка відповідає час, за якого зразок починає розтягуватись, а максимальному часу – час, за якого зразок руйнується.



**Рис.2.27.** Залежність мінімального часу нагрівання зразків від відстані нагрівача до матеріала з прикладанням навантаження 10 Н.

Таблиця 2.19

h, мм \ τ <sub>мін</sub> , с	60	80	100	120	140
ПП, δ=1,1 мм	19,5	33,7	34,7	50	76,7
ПС, δ=1,1 мм	5,5	9,2	12,2	18	27,7
ПС, δ=0,7 мм	6,5	6,8	8,7	14	20,5
ПЕ, δ=0,8 мм	7	15,5	18,1	21,3	
ПЕ, δ=0,5 мм	4,8	7,8	10,5	14,7	



**Рис.2.28.** Залежність максимального часу нагрівання зразків від відстані нагрівача до матеріала з прикладанням навантаження 10 Н.

Таблиця 2.20

h, мм \ τ <sub>макс</sub> , С	60	80	100	120	140
ПП, δ=1,1 мм	29,5	37,7	41,2	61,2	98,3
ПС, δ=1,1 мм	13	15,5	23,7	34,2	50
ПС, δ=0,7 мм	12,3	13,7	15,2	19,2	34,8
ПЕ, δ=0,8 мм	13,3	24,7	56,4	83,7	
ПЕ, δ=0,5 мм	11,2	14,2	30,9	48,3	

Також було проведено досліді по нагріванню ПЕТ-преформ. Початкові зразки показано на рис.2.29.

Досліді відбувались наступним чином: преформи розміщувались в утримувачі преформ та поступово нагрівались на певній відстані від нагрівача. При цьому забезпечувалось обертання преформи для рівномірного нагрівання зразка. Температура вимірювалась на дінці преформи за допомогою термометра.



**Рис.2.29.** Зразки преформ: 1-прозора; 2-коричнева; 3-зелена, 4-синя(для наступного видування пляшок об'ємом 5л).

Спочатку нагрівались прозорі преформи діаметром 27 мм, висотою 145 мм, товщиною стінки 1,5 мм для наступного видування пляшок об'ємом 2л; потім преформи зеленого кольору діаметром 24 мм, висотою 130 мм, товщиною стінки 1,2 мм для наступного видування пляшок об'ємом 1,25л; останніми нагрівались преформи коричневого кольору діаметром 27 мм, висотою 145 мм, товщиною стінки 1,5 мм для наступного видування пляшок об'ємом 2л. На рис.2.30 зображено преформи після проведення досліду.



**Рис.2.30.** Преформи після нагрівання.

В процесі нагрівання було відмічено, що поступово преформа «каламутніє», стає непрозорою. Це викликано тим, що нагрівання відбувається нерівномірно і непрозорі ділянки виникають в місцях, де матеріал вже плавиться та починає кристалізуватись. Температура, за якої відбувається плавлення кристалів поліетилентерефталата, становить близько 250 °С і ділянки, які кристалізувались, формуватись у пляшку вже не зможуть. Чим вище стає температура, тим більше падає в'язкість і полімер може деформуватись за допустимі проміжки часу. Це є основний принцип отримання пляшок з преформ, тобто необхідно нагріти преформу до температури, що відповідає 100 °С та за лічені секунди роздути пляшку.

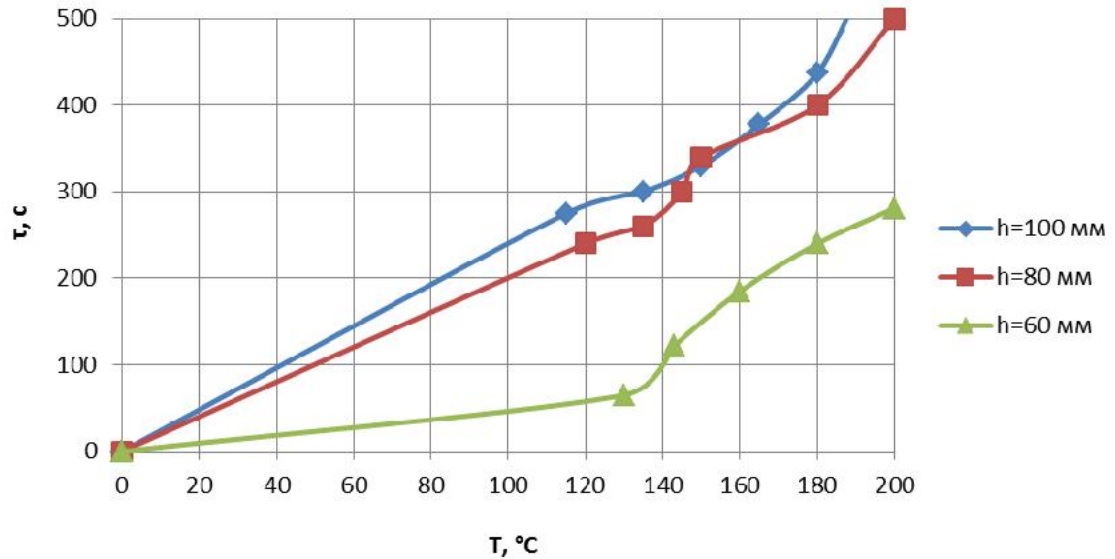
В результаті проведення експерименту отримано наступні дані.

При нагріванні прозорої преформи на відстані 100 мм від нагрівача на протязі 2 хв.30с температура дінця преформи піднялась до 80 °С та почалося помутніння зразка. При 4 хв.35с температура складала вже 115 °С, при 5 хв. – 135 °С, 5 хв.30с – 150 °С, 6 хв.18с – 165 °С, 7 хв.17с – 180 °С, 8 хв.40с – 190 °С, 9 хв.38с – 200 °С.

При нагріванні преформи зеленого кольору на відстані 80 мм від нагрівача на протязі 4 хв. температура дінця преформи піднялась до 120 °С, при 4 хв.20с температура складала вже 135 °С, при 5 хв. – 145 °С, 5 хв.40с – 150 °С, 6 хв.40с – 180 °С, 8 хв.20с – 200 °С.

При нагріванні преформи коричневого кольору на відстані 60 мм від нагрівача на протязі 1 хв.5с температура дінця преформи піднялась до 130 °С та почалося помутніння зразка. При 2 хв.2с температура складала вже 143 °С, при 3 хв.5с – 160 °С, 4 хв. – 180 °С, 4 хв.41с – 200 °С.

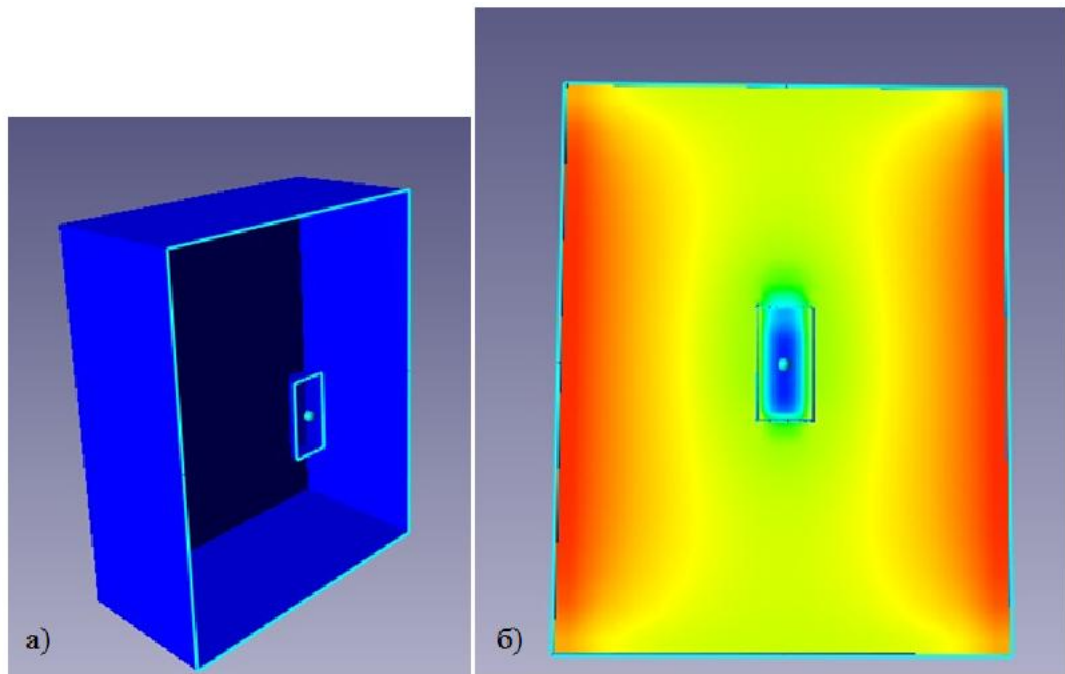
Зведені результати даних досліджень наведено на рис.2.31.



**Рис.2.31.** Залежність температури нагрівання преформ від часу нагрівання.

Приблизне відображення процесу нагрівання преформ у камерах з інфрачервоними випромінювачами показано на рис.2.32. Даний рисунок створено за допомогою програми FlowVision з наступними параметрами процесу:

- Температура нагрівачів – 400 °C;
- Початкова температура преформи – 25 °C;
- Ступінь чорноти стінок, на яких встановлено нагрівачі – 1;
- Ступінь чорноти стінок камери – 0,93;
- Ступінь чорноти преформи – 0,91;
- Густина преформи – 1400 кг/м<sup>3</sup>;
- Коефіцієнт теплопровідності преформи – 0,15 Вт/(м·К).



**Рис.2.32.** Процес нагрівання преформи в камері: а)схематичне зображення установки; б)нагрівання преформи.

В результаті проведеного патентного пошуку було модернізовано нагрівач преформ та усунуто виявлені недоліки і, відповідно, подано 4 заявки на отримання патентів на винахід та 4 заявки на отримання патентів на корисну модель.

У першій заявці засіб обертання осі опори виконано у вигляді котка, нерухомо встановленого відносно осі, який приводиться в рух від паса, розміщеного між приводним і натяжним шківками, і притискається до котка напрямною з пружиною. Така конструкція пристрою дозволить регулювати швидкість обертання преформи незалежно від швидкості її лінійного переміщення, що призводить до зменшення габаритів та підвищення якості процесу нагрівання. Застосування котків дозволяє спростити конструкцію пристрою та зменшити динамічні навантаження на елементи пристрою.

У другій заявці механізм завантаження преформ виконано у вигляді ложементів, розміщених впоперек конвеєра нагрівача, над кожним ложементом встановлено живильник преформ і навпроти кожного ложементу встановлено перештовхувач преформ у гнізда конвеєра. Внаслідок запропонованого конструктивного рішення нагрівача преформ суттєво

спроститься його конструкція, матеріалоемність та монтаж пристрою і, як наслідок, надійність його роботи.

У третій заявці конвеєр має робочий контур у вигляді рівнобедреного або рівностороннього трикутника, а механізм завантаження преформ виконано у вигляді ложементів, розміщених впоперек конвеєра нагрівача, над кожним ложементом встановлено живильник преформ і навпроти кожного ложементу встановлено перештовхувач преформ у гнізда конвеєра. Внаслідок запропонованого конструктивного рішення нагрівача преформ суттєво спроститься його конструкція, матеріалоемність та монтаж пристрою і, як наслідок, надійність його роботи. Окрім того, виконання робочого контуру конвеєра у вигляді рівнобедреного або рівностороннього трикутника суттєво зменшить габарити пристрою, зокрема його довжину.

У четвертій заявці нагрівач складається з камери з інфрачервоними випромінювачами, вздовж якої розміщено вертикально замкнутий конвеєр з носіями преформ, встановленими перпендикулярно його поверхні хоча б двома паралельними рядами, при цьому на вхідному кінці конвеєра змонтовано механізм завантаження преформ. Носії преформ виконані у вигляді осі, встановленої з можливістю обертання в опорі, закріпленій на планці, при цьому вісь споряджена посадочним місцем для преформи на верхньому кінці та засобом її обертання на нижньому кінці, який виконано у вигляді котка, нерухомо встановленого відносно осі, який приводиться в рух від паса, розміщеного між приводним і натяжним шківом, і притискається до котка напрямною з пружиною. Механізм завантаження преформ виконано у вигляді ложементів, розміщених впоперек конвеєра нагрівача, над кожним ложементом встановлено живильник преформ і навпроти кожного ложементу встановлено перештовхувач преформ у гнізда конвеєра. Така конструкція пристрою дозволить регулювати швидкість обертання преформи незалежно від швидкості її лінійного переміщення, що призводить до зменшення габаритів та підвищення якості процесу нагрівання. Застосування котків

дозволяє спростити конструкцію пристрою та зменшити динамічні навантаження на елементи пристрою.

Запропоновані конструктивні рішення, короткий опис винаходу та копії позитивних рішень про видачу відповідних патентів на винахід та патентів на корисну модель наведено у додатках.

#### **2.4.Висновки експериментальних досліджень.**

Після проведення багатофакторного активного експерименту було визначено математико-статистичну модель процесу нагрівання плоских зразків, що є адекватною та відтворюваною і може використовуватися в подальших розрахунках.

За отриманими в результаті експериментальних досліджень даними ми отримали змогу наочно розглянути залежності між параметрами процесу нагрівання та характеристиками зразків та визначити оптимальні значення. Слід відмітити, що оптимальна відстань від нагрівача до матеріала при нагріванні невеликих зразків становить 80 мм, так як час нагрівання при цьому мінімальний для будь-яких товщин зразків з різних матеріалів. Приблизно кращий час нагрівання на відстані 80 мм від нагрівача при навантаженні 10 Н зразка з ПП товщиною 1,1 мм складає 25 с, ПС товщиною 1,1 мм – 14 с, ПС товщиною 0,7 мм – 10 с, ПЕ товщиною 0,8 мм – 15с, ПЕ товщиною 0,5 мм – 11с.

Необхідно звернути увагу на характер деформування зразків з різних матеріалів в процесі нагрівання. Зразки з ПП розтягуються з утворенням шийки та при тривалому нагріванні руйнуються, зразки з ПС розтягуються з утворенням шийки і при зніманні навантаження зкручуються, зразки з ПЕ не витримують навантаження 20 Н, а при прикладанні менших навантажень надмірно витончуються без утворення шийки та руйнуються з утворенням розривів всередині зразка.

## Висновки

Нагрівання є тривалим і відповідальним етапом в процесі формування полімерної упаковки, тому необхідним є контролювання і регулювання показників цього процесу.

Перевагами інфрачервоного нагрівання є високий ККД, швидке прогрівання та невеликі витрати на монтаж та експлуатацію установки. Використання відповідних нагрівачів дає можливість регулювати температуру, знизити теплові втрати; можливим є глибоке та рівномірне прогрівання матеріалу, що дуже важливо для отримання конкурентоздатних готових виробів.

Проведені дослідження показують, що на процес формування виробу впливають такі фактори як час нагрівання заготовки, інтенсивність теплового потоку, відстань від нагрівача до матеріала, товщина, колір та фізико-механічні властивості матеріалу, температура нагрівання. Так як рівномірність розподілу температури є основою утворення якісного виробу, тому слід визначити її залежність від найсуттєвіших факторів процесу, а саме часу нагрівання, товщини заготовки та теплопровідності матеріалу. Дослідні дані та наступні розрахунки дозволили створити математико-статистичну модель процесу нагрівання при термоформуванні, яка є відтвореною в часі і просторі та є адекватною досліджуваному об'єкту.

Можна відмітити, що оптимальна за характеристиками відстань від нагрівача до матеріала при нагріванні невеликих плоских зразків становить 80мм. На відстані від нагрівача до матеріала, що складає 120мм, оптимальними є величини часу нагрівання для зразків з: ПП – 45с, ПС товщиною 1,1 мм – 30с, ПС товщиною 0,7мм – 18с, ПЕ товщиною 0,8мм – 50с, ПЕ товщиною – 25с. Відповідно на мінімальній відстані від нагрівача до матеріала (60мм) кращий час нагрівання становить для зразків з: ПП – 23с, ПС товщиною 1,1 мм – 10с, ПС товщиною 0,7мм – 8с, ПЕ товщиною 0,8мм – 7с, ПЕ товщиною – 6с.

### Список використаної літератури

1. Гавва О.М., Масло М.А., Яровий В.Л. Пристрої подачі рулонного пакувального матеріалу // Упаковка. – 2005. – №5. – С.46-54.
2. Картон. Тара и упаковка: Киев: ИАЦ «Упаковка», 1999 – С.186, рис 5.31 б.
3. Методичні вказівки до постановки і оброблення результатів багатофакторного експерименту для студентів спец. 7.09.0223 «Машини і технологія пакування» ден. Форм навчання та аспірантів / Уклад. К.В. Васильківський, А.І. Соколенко, О.Ю. Шевченко. – К: УДУХТ, 2000. – 16с.
4. А.І. Соколенко, К.В. Васильківський, О.Ю. Шевченко та ін. Моделювання процесів пакування./ За ред. Соколенка/ Підручник. – Вінниця: Нова Книга, 2004. – 272с.
5. Коваль І.Й., Юно М.І., Васильківський К.В. Динаміка обтягування плівкою пакет-піддонів // Харчова промисловість. Міжвідомчий тематичний науковий збірник. – К.: НУХТ. – № 45. – 2000. – С. 255-259.
6. Коваль І.Й. Динаміка пристроїв для обтягування пакет-піддонів плівкою // Харчова промисловість. – К.: НУХТ. – 2003. – №2. – С. 73-74.
7. Коваль І.Й., Васильківський К.В. Визначення натягів плівки при обгортанні пакет-піддонів // Харчова промисловість. –К.: НУХТ. – 2003. – №45. – С.75-76
8. Гавва О.М. Пакувальне обладнання. Обладнання для групового пакування / Гавва О.М., Беспалько А.П., Волчко А.І. – К.: ІАЦ “Упаковка”, 2007. – 136 с.
9. Гавва О.М. Пакувальне обладнання. Обладнання для пакування продукції у споживчу тару / Гавва О.М., Беспалько А.П., Волчко А.І. – К.: ІАЦ “Упаковка”, 2008. – 436 с.
10. Гавва О.М., Пакувальне обладнання. Обладнання для обробки транспортних пакетів / Гавва О.М., Беспалько А.П., Волчко А.І. – К.: ІАЦ

- В.Г. Рєзнік, І.Ф. Максименко, А.І. Соколенко, М.В. Якимчук „Перехідні режими в процесах транспортування вантажів”. Стаття із журналу „Упаковка” №3 2006р. – 44-46 с.
11. А.І. Соколенко, д.т.н., В.Г. Рєзнік, Ю.О. Мальська, С.А. Бут „Енерговитрати і кінематика переміщення вантажів” Стаття із журналу „Упаковка” №2 2006р. – 27-29с.
  12. Соколенко А.И., Українець А.И., Яровой В.Л. и др. Справочник специалиста пищевых производств. —К.: АртЭк, 2003. — 432 с.
  13. Соколенко А.И., Українець А.И., Яровой В.Л. Справочник механика пищевой промышленности. — К.: АртЭк, 2004. — 304 с.
  14. Пакувальне обладнання: [підручник] / О.М. Гавва, А.П. Беспалько, А.І. Волчко, О.О. Кохан – К.: ІАЦ “Упаковка”, 2010. – 744 с.
  15. Моделювання технологічних процесів [Електронний ресурс] : методичні рекомендації до проведення практичних занять для здобувачів освітнього ступеня “Магістр” спеціальності 131 “Прикладна механіка” освітньо-професійної програми “Прикладна механіка” денної та заочної форм навчання / укладачі : А. І. Соколенко, К. В. Васильківський. – Київ : НУХТ, 2019. – 23 с.
  16. Розрахунок і конструювання функціональних мехатронних модулів [Електронний ресурс] : методичні рекомендації до проведення практичних занять для здобувачів освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 131 Прикладна механіка освітньо-професійної програми «Прикладна механіка» денної та заочної форм навчання / укладачі : Л. О. Кривопляс-Володіна, С. В. Токарчук ; Національний університет харчових технологій. – Київ : НУХТ, 2022 – 68 с.
  17. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи (проекту) на здобуття освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 131 «Прикладна механіка» освітньо-професійної програми «Прикладна механіка» денної та заочної форм навчання [Електронний ресурс] / укладачі : А. І. Соколенко, Л. О. Кривопляс-Володіна, М. В. Якимчук, К.

В. Васильківський, С. В. Токарчук ; Національний університет харчових технологій. – Київ : НУХТ, 2021. – 30 с.

18. Патент UA 23267A, МПК В29С 49/28. Установка для нагрівання заготовок/Косс А.І. – Опубл. 19.05.1998. – Бюл. №10.

19. Патент UA 51976A, МПК В29С 39/38. Нагрівач преформ/Суворов О.В., Пастушенко В.Д. – Опубл. 16.12.2002. – Бюл. №12.

20. Патент UA 70475A, МПК В29С 39/38. Нагрівач преформ/Суворов О.В., Пастушенко В.Д., Раловець М.М. – Опубл. 15.10.2004. – Бюл. №10.

21. Патент UA 78505, МПК В29С 49/28. Лінія для виготовлення ПЕТ-пляшок/ Суворов О.В., Пастушенко В.Д., Раловець М.М. – Опубл. 10.04.2007. – Бюл. №4.

22. Florian J. Practical thermoforming: Principles and applications. – New York; Basel: Dekker. – 1987. – 371p.

23. Klein R.M. Bearbeitung von Polymerwerkstoffen mit infraroter Laserstrahlung: Diss. – Aachen. – 1990. – 161s.

24. Kuppers M. Anwendung numerischer Methoden beim Thermoformen: Diss. – Aachen. – 1991. – 152s.

25. Rosato D.V. Injection molding handbook/Ed. by D.V.Rosato. – 1986. – 899p.

26. Throne J.L. Thermoforming. – Munich et al.: Hanser. – 1987. – 298p.

27. Weinand D. Modellbildung zum Aufheizen und Verstrecken beim Thermoformen: Diss. – Aachen. – 1987. – 130s.

28. <http://www.elcer.com.ua>.

29. <http://www.nomacn.by/new/ik/ik-about.html>..