

КРУТАСЬ І. О., магістрант; МІКУЛЬОНОК І. О., д.т.н., проф.;  
 ПЕТУХОВ А. Д., д.т.н., проф., СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л., к.т.н., доц.  
 Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО СТАНУ ОХОЛОДЖУВАНИХ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ

*Розглянуто результати числового моделювання температурних полів і полів напружень у стінці полімерних труб двох типорозмірів ( $\varnothing 90$ , SDR 6 і  $\varnothing 63$ , SDR 9) за різних умов охолодження. Показано, що двостороннє охолодження труб (особливо за участі води як холодоагенту), не лише інтенсифікує процес охолодження, але й може призвести до виникнення в їхніх стінках значних механічних напружень, що негативно впливатиме на якість екструдованих труб.*

**Ключові слова:** полімерна труба, охолодження, термомеханічний стан, ефективність.

© Крутась І. О., Мікульонок І. О., Петухов А. Д., Сокольський О. Л., 2013.

**Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень.** Останнім часом є помітною стійка тенденція до впровадження полімерних труб для будівництва нових трубопроводів і поступової заміни ними металевих і залізобетонних труб [1]. Полімерну трубу формують з одержуваного в екструдері розплаву, який проходить крізь трубну формувальну головку з наступним калібруванням і частковим охолодженням в калібрувальному пристрої та остаточним охолодженням у водяних чи вакуум-водяних охолодних ваннах [2, 3].

Натепер питання охолодження полімерної заготовки під час екструдювання полімерних труб різного перерізу, у тому числі інтенсифікація зазначеного процесу, вивчені достатньо докладно [4]. Також досліджено вплив параметрів охолодження на якісні показники полімерних труб [5, 6].

Навіть за однакового перероблення полімеру щільність упакування його макромолекул може змінюватися залежно від параметрів перероблення, зокрема від швидкості охолодження розплаву. При цьому залежно від технологічних параметрів, зокрема температури перероблення й швидкості охолодження, експлуатаційні властивості виробу можуть істотно змінюватися. Особливо це характерно для кристалічного або частково кристалічного полімеру, зокрема для поліетилену, під час охолодження його розплаву, коли температура полімеру змінюється в широкому діапазоні: від температури вище температури плавлення (твердіння) до температури навколишнього середовища [7–10].

Водночас, у літературі майже відсутня інформація щодо кількісного аналізу впливу умов охолодження полімерної заготовки на утворення внутрішніх залишкових напружень у полімерній трубі.

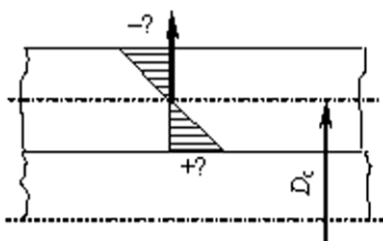
**Метою статті** є встановлення умов і параметрів охолодження трубної полімерної заготовки на її термомеханічний стан під час виготовлення полімерних труб екструзією.

**Виклад основного матеріалу.** Нерівномірне та/чи занадто інтенсивне охолодження з обох боків у калібрувальному пристрої чи охолодних ваннах є причиною утворення залишкових напружень у стінці труби, що можуть погіршити її якість, зокрема призвести до появи дефектів форми [4, 5]. Оскільки твердіння полімерів у більшості випадків відбувається в певному температурному діапазоні, то за наявності температурного градієнта швидкість твердіння за товщиною стінки є різною, що спричиняє різну зміну об'єму в окремих прошарках матеріалу, отже утворення в стінці градієнта напружень (рис. 1) [11–13].

Залишкові напруження в трубі є пропорційними градієнту температури, відповідно умови охолодження істотно впливають на властивості одержуваних полімерних труб.

Як уже було зазначено, застосування двостороннього охолодження трубчастої полімерної заготовки сприяє інтенсифікації охолодження гладких полімерних труб [4]. При цьому найбільш ефективним способом двостороннього охолодження труб малого діаметра (до 90 мм включно) є зовнішнє водяне і внутрішнє повітряно-водяне охолодження. Установлено, що застосування двостороннього охолодження дає змогу поліпшити якість внутрішньої поверхні труб, оскільки воно сприяє швидшому твердінню внутрішніх шарів заготовки та фіксації її гладкої відформованої в трубній головці внутрішньої поверхні [5].

Що стосується труб великого діаметра (понад 90 мм), то застосування внутрішнього протитечійного повітряного і повітряно-водяного охолодження під час екструдювання не погіршує якість їх внутрішньої поверхні [4, 6]. При цьому забезпечується зменшення тривалості охолодження в 1,2 раза за умови використання як холодоагенту повітря і в 1,5 раза – повітряно-водяної суміші.



$D_c$  – середній діаметр труби, м;  
 $\sigma$  – напруження, МПа

**Рис. 1 – Розподіл залишкових напружень у стінці труби під час зовнішнього охолодження**

Надмірна інтенсифікація в разі внутрішнього охолодження труби повітряно-водяною сумішшю істотно погіршує якість внутрішньої поверхні. Витрату води при цьому слід визначати окремо для кожного типорозміру і режиму екструзування. За використання же комбінованої повітряно-водяної системи охолодження забезпечується не тільки ефективне охолодження труби, а й зменшення градієнта температури в стінці труби, отже

залишкових напружень.

Охолодження труби може бути одностороннім зовнішнім чи внутрішнім або двохстороннім (у тому числі комбінованим – за умови різних умов охолодження з боку внутрішньої й зовнішньої поверхонь стінки труби). Авторами розглянуто охолодження: одностороннє водою, двостороннє водою та двостороннє (внутрішнє – повітря, зовнішнє – вода) за таких умов: температура охолодної води 20 °С, температура повітря 15 °С, початкова температура трубної заготовки 120 °С (вище за температуру твердіння), довжина ділянки охолодження 4 м. При цьому швидкість труби  $\varnothing 90$ , SDR 6 становила 0,017 м/с;  $\varnothing 63$ , SDR 9 – 0,048 м/с. Матеріал труби – поліетилен низького тиску (високої густини) ГОСТ 16338–85.

Для аналізу термомеханічного стану охолоджуваної трубної заготовки потрібна наявність математичної моделі, що враховуватиме властивості полімерного матеріалу та умови охолодження [4, 14].

Для узагальненої ньютонівської рідини потрібно розв'язати три основні рівняння:

– кількості руху:  $-\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} + \mathbf{f} = \rho \mathbf{a}$ , де  $p$  – тиск, МПа;  $\mathbf{T}$  – тензор напружень;  $\mathbf{f}$  – об'ємна сила, Н/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $\mathbf{a}$  – прискорення, м/с<sup>2</sup>;

– нерозривності:  $\nabla w = 0$ , де  $w$  – швидкість, м/с;

– енергії:  $-\rho c_p \frac{DT}{Dt} = r - \nabla \cdot \mathbf{q} + (\sigma \mathbf{D})$ , де  $c_p$  – масова ізобарна теплоємність, Дж/(кг · К);  $T$  – температура, °С;  $r$  – питомий об'ємний тепловий потік від зовнішніх джерел, Вт/м<sup>3</sup>;  $\mathbf{q}$  – тепловий потік, Вт;  $\sigma$  – тензор напружень Коші;  $\mathbf{D}$  – тензор швидкості деформації;  $(\sigma \mathbf{D})$  – сума діагональних членів  $\sigma \mathbf{D}$ ;  $\frac{DT}{Dt} = \frac{dT}{dt} + w \nabla T$  – субстанціальна похідна за температурою.

Для узагальненої ньютонівської рідини тензор напружень  $\mathbf{T} = 2\eta(\dot{\gamma}, T)\mathbf{D}$ , де  $\eta$  – ефективна в'язкість, Па;  $\dot{\gamma}$  – швидкість зсуву, с<sup>-1</sup>;  $\mathbf{D} = (\nabla w + \nabla w^T)/2$ , при цьому  $\dot{\gamma} = \sqrt{2(\mathbf{D}^2)}$ .

Загальний закон в'язкості:  $\eta(\dot{\gamma}, T) = F(\dot{\gamma})H(T)$ , де  $F\dot{\gamma}$  – залежність швидкості зсуву від в'язкості;  $H(T)$  – залежність температури від в'язкості.

Оскільки трубна заготовка рухається крізь охолодну ванну як суцільне тверде тіло, застосовуємо закон сталої залежності швидкості зсуву від в'язкості. Оскільки в цьому режимі швидкість зсуву відсутня, то складові залежності в'язкості  $F(\dot{\gamma}) = \eta_0$ ;  $H(T) = 1$ , де  $\eta_0$  – в'язкість за нульової швидкості зсуву, Па · с.

Напруження від перепаду температури  $\Delta T$  у стінці труби за умови її вісесиметричного охолодження:

$$\sigma_r = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu)\ln\frac{r_2}{r_1}} \left[ \ln\frac{r_2}{r} + \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_2^2}{r^2}\right) \ln\frac{r_2}{r_1} \right]; \quad \sigma_\theta = -\frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu)\ln\frac{r_2}{r_1}} \left[ 1 - \ln\frac{r_2}{r} - \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2}\right) \ln\frac{r_2}{r_1} \right];$$

$$\sigma_z = -\frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\mu)\ln\frac{r_2}{r_1}} \left[ 1 - 2\ln\frac{r_2}{r} - \frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \ln\frac{r_2}{r_1} \right],$$

де  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_z$  – напруження в радіальному, коловому та осьовому напрямках охолоджуваної труби, Па;  $E$  – модуль пружності матеріалу труби під час стиску, Па;  $\alpha$  – коефіцієнт температурного розширення, с<sup>-1</sup>;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу труби;  $r_1$ ,  $r_2$  – внутрішній та зовнішній радіуси труби, м;  $r$  – поточний радіус, на якому розглядають стан матеріалу, м;  $\Delta T$  – різниця температур, °С.

Еквівалентне напруження за III теорією міцності  $\sigma_{\text{екв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2}$ , де  $\sigma_{\text{екв}}$  – еквівалентне напруження в точці, що розглядається. Па.

Межові умови наведено в табл. 1, а результати розрахунку охолодження – на рис. 2, 3 і в табл. 2.

**Таблиця 1 – Межові умови методики розрахунку**

Межові умови	
Механічні	Теплові
1. Вихідні умови на вході на ділянку охолодження. Встановлюють об'ємну швидкість потоку крізь межу, оточену іншими з визначеними умовами адгезії. 2. Умови ковзання. Узагальнений закон Нав'є $f_s = F_{\text{slip}} (w_{\text{wall}} - w_s) w_{\text{wall}} - w_s  ^{e_{\text{slip}}-1}$	1. Межові умови першого роду: $T _{S_T} = T_0,$ де $S_T$ – поверхня, на якій задано температуру. 2. Умови симетрії (адіабатні умови):

де  $w_s$  і  $w_{wall}$  – тангенціальні швидкості потоку й стінки, м/с;  $F_{slip}$ ,  $e_{slip}$  – параметри матеріалу:

$$w_{wall} = 0, F_{slip} = 0.$$

3. Умови симетрії. Виконуються за умови, що тангенціальна сила й нормальна швидкість дорівнюють нулю:

$$f_s = 0, w_n = 0.$$

4. Умови на кінцевому торці. Вихідні умови такі ж, як і для умов нормальної сили й тангенціальної швидкості:

$$f_n = 0, w_s = 0.$$

$$\vec{\nabla}T \Big|_{S_{ST}} = 0,$$

де  $S_{ST}$  – площа поверхні симетрії тіла, м<sup>2</sup>.

3. Межові умови третього роду:

$$\mathbf{q} \cdot \mathbf{n} \Big|_{S_q} = \alpha(T - T_x),$$

де  $\mathbf{q}$  – густина теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>;  $S_q$  – поверхня, на якій задано межові умови;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $T_x$  – температура холодоагенту (навколишнього середовища), °С.

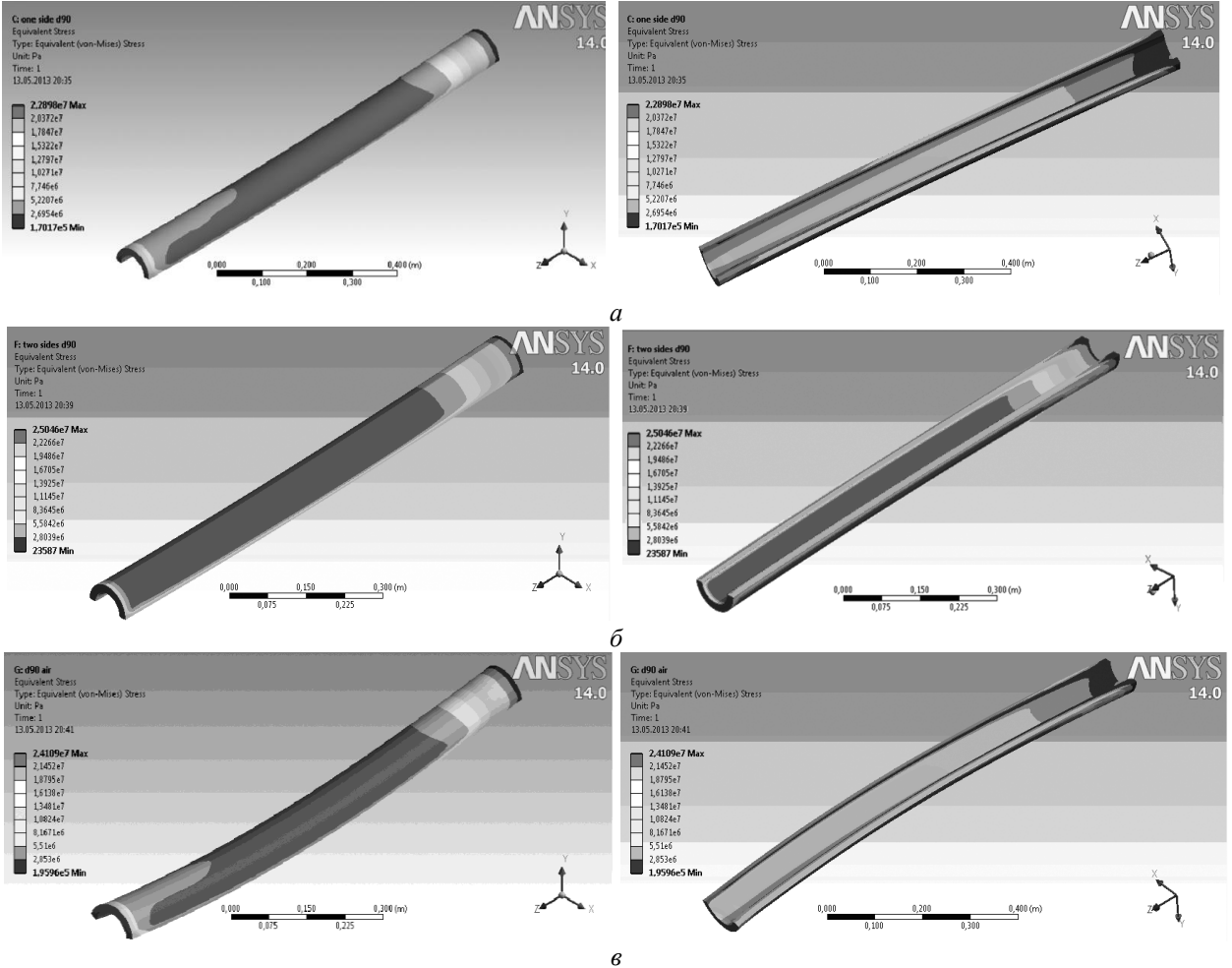
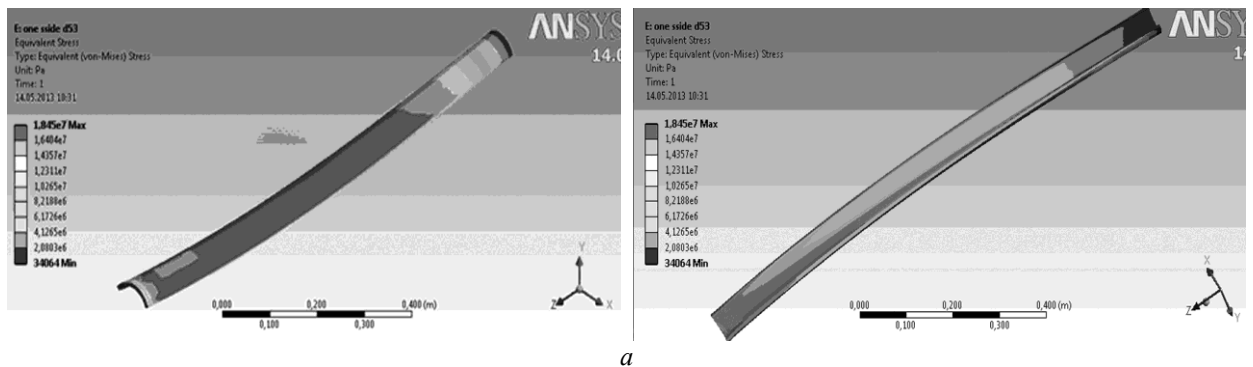
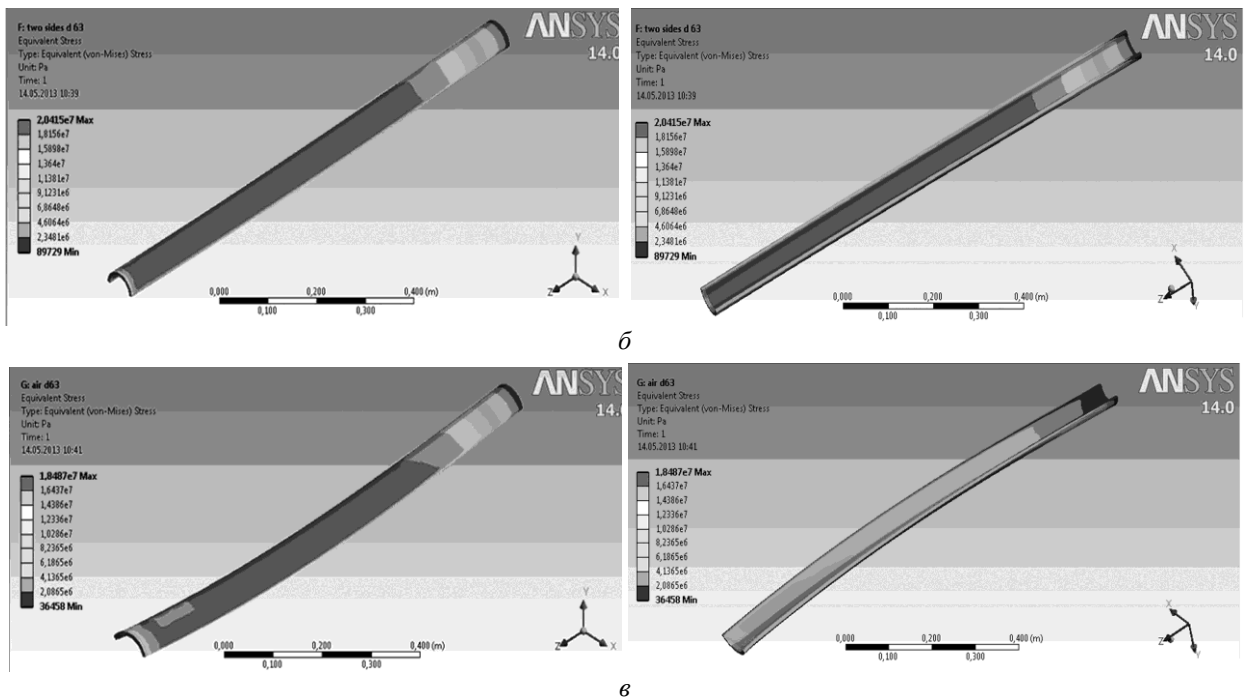


Рис. 3 – Розподіл залишкових напружень за довжиною труби із зовнішнім діаметром 90 мм за одностороннього (а) і двостороннього (б) охолодження водою та двостороннього комбінованого (в) охолодження (зовнішнє – повітря, внутрішнє – вода)





**Рис. 3 – Розподіл залишкових напружень за довжиною труби із зовнішнім діаметром 63 мм за одностороннього (а) і двостороннього (б) охолодження водою та двостороннього комбінованого (в) охолодження (зовнішнє – повітря, внутрішнє – вода)**

Наведені дослідження стосуються випадку, коли температура полімера перед початком охолодження є нижчою, аніж температура твердіння. Коли ж відформований виріб охолоджується від температури, що перевищує температуру твердіння, слід враховувати процеси, притаманні режиму твердіння [8, 9].

**Таблиця 2 – Залишкові напруження в стінці труби (допустиме – 30 МПа)**

Максимальні залишкові напруження, МПа	
Ø93, SDR 6	Ø63, SDR 9
Одностороннє охолодження (зовнішнє – водою)	
22,9	18,5
Двостороннє охолодження водою	
25,0	20,4
Двостороннє охолодження (зовнішнє – повітря, внутрішнє – вода)	
24,1	18,5

**Висновки.** Отриманий розподіл залишкових напружень за довжиною труби за різних режимів охолодження дав змогу встановити, що найбільші напруження виникають за умови двостороннього охолодження, яке може призвести до погіршення якості труби. Найменші напруження виникають за умови одностороннього охолодження, яке, однак, є тривалішим і вимагає більших виробничих площ під ванни охолодження. Тому найбільш ефективним з точки зору «інтенсивність охолодження – залишкові напруження» є двостороннє комбіноване охолодження (водно-повітряне).

#### Список використаної літератури

1. Мурашов Р. Полимерные трубы. Классификация и назначение / Р. Мурашов // Строительная инженерия. – 2004. – С. 12–16.
2. Мікульонок І. О. Класифікація одержуваних екструзією виробів з термопластів / І. О. Мікульонок, І. О. Крутась // Наук. вісн. Нац. техн. ун-ту України «Київ. політехн. ін.-т»; сер. «Хім. інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2012. – № 2 (10). – С. 13-16.
3. Мікульонок І. О. Охолодження екструдованих профільних виробів з термопластичних матеріалів / І. О. Мікульонок, І. О. Крутась // Наук. вісн. Нац. техн. ун-ту України «Київ. політехн. ін.-т»; сер. «Хім. інженерія, екологія та ресурсозбереження». – 2012. – № 2 (10). – С. 16-20.
4. Вознюк В. Т. Інтенсифікація процесу виготовлення екструдованих полімерних труб / В. Т. Вознюк, І. О. Мікульонок. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 142 с.
5. Вознюк В. Т. Исследование двустороннего охлаждения экструдированных гладких полимерных труб. Часть 1. Охлаждение труб малого диаметра / В. Т. Вознюк, И. О. Микулёнок, А. Д. Петухов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – № 11. – С. 8-11.

6. *Вознюк В. Т.* Исследование двустороннего охлаждения экструдруемых гладких полимерных труб. Часть 2. Охлаждение труб большого диаметра / В. Т. Вознюк, И. О. Микулёнок, А. Д. Петухов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – № 12. – С. 37-39.
7. *Лебедев С. М.* Влияние технологических параметров на физико-механические характеристики поликарбоната / С. М. Лебедев, О. С. Гефле // Пластические массы. – 2012. – № 11. – С. 51-53.
8. *Труфанов Н. А.* Математическая модель образования технологических напряжений в пластмассовой изоляции провода / Н. А. Труфанов, Н. М. Труфанова, Д. И. Широких // Пластические массы. – 1997. – № 8. – С. 33-36.
9. *Зиннатуллин Р. Р.* Численное моделирование технологических напряжений при изготовлении пластмассовой изоляции провода / Р. Р. Зиннатуллин, Н. М. Труфанова // Вычислительная механика сплошных сред. – 2009. – Т. 2. – № 1. – С. 38-53.
10. *Калинчев Э. Л.* Свойства и переработка термопластов / Э. Л. Калинчев, М. Б. Саковцева. – Л. : Химия, 1983. – 288 с.
11. *Бисеров В. Т.* Охлаждение полимерных труб в процессе их производства методом экструзии / В. Т. Бисеров, И. В. Гвоздев, М. И. Горилловский, В. А. Швабауэр // Полимерные трубы. – 2008. – № 1. – С. 18-20.
12. *Биргер И. А.* Остаточные напряжения / И. А. Биргер. – М. : Машгиз, 1963. – 232 с.
13. *Володин В. П.* Экструзия профильных изделий из термопластов / В. П. Володин. – СПб. : Профессия, 2005. – 480 с.
14. *Мікульонок І. О.* Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини / І. О. Мікульонок. – К. : Політехніка, 2009. – 265 с.  
Надійшла до редакції 01.04.2013.