

## Особенности ротационного формования термопластов

М.С. ИГУМЕНОВ, Н.А. ЛАВРОВ

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)  
Ina@lti-gti.ru

Рассмотрены особенности процесса ротационного формования термопластов. Проанализированы процессы теплопередачи. Изучено влияние размера частиц полимера на распределение перерабатываемого материала внутри ротационной формы, продолжительность перехода полимера из твердого в вязкотекущее состояние. Рассмотрена зависимость равнотолщинности изделия из линейного полиэтилена от скорости вращения ротационной формы.

**Ключевые слова:** Ротационное формование, линейный полиэтилен низкой плотности, скорость вращения формы, гранулометрический состав, равнотолщинность изделий.

Characteristic features of rotational molding of thermoplastics were examined. The processes of heat transfer were analysed. The influence of particle size of the polymer on the distribution of the processed material inside the rotational mold, the duration of the transition of the polymer from the solid to the plastic state were studied. The dependence of the thickness tolerances of the product of linear polyethylene from the speed of rotation of the rotational mold was studied.

**Keywords:** Rotation molding, linear polyethylene of low density, speed of rotation of rotational mold, particle size composition, the thickness tolerances of the products.

Ротационное формование (РФ) – это метод переработки полимерных материалов (ПМ), позволяющий получать крупногабаритные польые изделия (сосуды, баки для воды и топлива, септики, навигационные знаки, дорожные блоки, понтоны) [1]. Среди материалов, перерабатываемых методом РФ, доминирующее место занимает полиэтилен (ПЭ). Наиболее распространен линейный полиэтилен низкой плотности (ЛПЭНП) [2], который по сравнению с другими марками ПЭ обладает более узким ММР, в его молекулярной структуре больше сравнительно коротких ответвлений от основной макроцепи. Это обеспечивает повышенную прочность [3]. В таблице 1 приведены некоторые свойства отечественных и зарубежных марок ПЭ, пригодных для переработки методом ротационного формования.

Выбор оснастки для РФ, определяется геометрией и размерами изделий, номенклатурой производства и ассортиментом перерабатываемых материалов [5–7]. Отличительной особенностью процесса ротационного формования от наиболее распространенных методов переработки термопластов (литье под давлением, экструзия) [8], является то, что передача тепла полимерному материалу на стадиях расплавления сырья и отвод тепла на стадии охлаждения происходит через стенку ротационной формы.

### Распределение материала внутри ротационной формы

Сущность метода ротационного формования заключается в том, что термопластичный материал, помещенный во вращающуюся в двух плоскостях форму, при нагревании перемешивается, расплавляется, равномерно распределяется на внутренней поверхности формы и охлаждается вместе с формой, образуя изделие заданной конфигурации [9].

Можно выделить четыре стадии процесса ротационного формования (рисунок 1).

На первом этапе материал находится в твердом состоянии. Температура материала ( $T_m$ ) с формой ( $T_\phi$ ) и температура ок-

ружающей среды ( $T_{окр}$ ) изначально одинаковы и составляют 20°C ( $T_\phi = T_m = T_{окр}$ ). На данном этапе начинается разогрев материала с формой до температуры плавления полимера. Материал свободно пересыпается при вращении ротационной формы, происходит первичное распределение материала внутри формы.

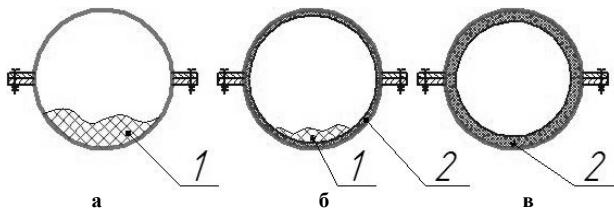


Рисунок 1. Стадии ротационного формования изделия [1];  
а – первая стадия; б – вторая стадия; в – третья стадия;  
1 – порошкообразный материал; 2 – расплавленный материал

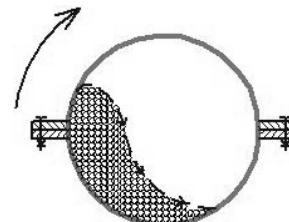


Рис. 2. Движение порошкообразного материала в форме.

Полимерный материал за счет действия силы тяжести перемещается как одно целое. Частицы, находясь внутри вращающейся формы, остаются в постоянном контакте друг с другом, перемещаясь вместе с ее поверхностью до тех пор, пока его часть не превысит динамический угол естественного откоса. Порция материала, превысившая данный угол, отрывается от стенки формы и пересыпается в основание формы (рисунок 2). Перемещение частиц полимера внутри формы зависит от его сыпучести, определяемой углом естественного откоса.

Таблица 1. Свойства различных марок полиэтилена, пригодных для переработки методом ротационного формования [4].

Показатель	Марки ЛПЭНП (зарубежные)				Марки ПЭ (отечественные)	
	UR-644	UR-754	RG-500	CSG (M3804)	ПЭНД 295-73	ПЭВД 11503-070 УУП
Размер частиц, мм	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5	0,4-0,5	0,5-0,6	0,55-0,60
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	936	936-940	938	938	962	918
ПТР, г/10 мин	5,0	3,5-4,5	5,0	4,0	2,6-3,2	7,0
Т <sub>пл</sub> , °C	124	128	123	125	---	---

Поскольку на данном этапе материал не расплавлен, то он представляет собой физическое тело, подчиняющееся законам механики:

$$mg > F_{\text{тр}} \quad (1)$$

В результате непрерывного вращения ротационной формы и действия силы тяжести материал перемещается в ротационной форме по сложной пространственной траектории, вычисляемой геометрическим сложением векторов скоростей движения –  $V_x$ ,  $V_y$  и  $V_z$ :

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (2)$$

Разогрев ротационной формы до температуры плавления полимера условно можно считать окончанием первого этапа ротационного формования.

Второй этап характеризуется нагревом формы до температуры, приводящей к расплавлению порции термопласта, и образованию вязкотекущего слоя полимера на внутренней поверхности ротационной формы. Размер расплавленного слоя соизмерим с размером частиц термопласта. Образование вязкотекущего слоя полимера условно можно считать окончанием второй стадии формования, на которой материал находится как в твердом, так и в расплавленном состояниях,

На третьем этапе происходит постепенное расплавление полимерного материала и его распределение по внутренней поверхности ротационной формы. По мере продолжающегося нагрева порошкообразный материал пересыпается по увеличивающемуся по толщине вязкотекущему слою термопласта. При этом действие силы трения и достаточная вязкость расплава исключают перемещение материала относительно стенки формы. Здесь происходит окончательное расплавление частиц порошка.

После перехода всего материала в вязкотекущее состояние заканчивается третья стадия формования изделия.

На четвертом этапе происходит охлаждение ротационной формы с изделием.

#### *Влияние размера частиц перерабатываемого термопластика на процессы расплавления полимера в ротационной форме*

В отличие от известных способов пластикации, при переработке полимерных материалов методом ротационного формования не происходит уплотнения, скатия и гомогенизации расплава. Переход ПМ из твердого состояния в вязкотекущее зависит не только от теплопроводности материала и конструкции используемой формы, но и от наличия воздушных промежутков между частицами полимерного сырья. Поэтому размер частиц материала оказывает значительное влияние на длительность цикла производства и на качество получаемого изделия.

Для оценки влияния размера частиц перерабатываемого материала на продолжительность перехода полимера из твердого состояния в вязкотекущее был исследован ЛПЭНП торговой марки UR-644 с размером частиц: 200–300 мкм, 400–500 мкм, 600–700 мкм, 3000–4000 мкм. Для каждой из фракций определена продолжительность перехода из твердого состояния в состояние расплава, для этого использовали навеску каждой фракции массой 20 граммов. Исследование проводили в металлических формах одинаковой геометрии при температуре 200°C. Результаты исследований приведены в таблице 2.

Из таблицы видно, что увеличение размеров частиц приводит к нелинейному возрастанию длительности расплавления. Это можно объяснить наличием воздушных промежутков между частицами материала и размером самих частиц. Можно отметить, что продолжительность расплавления материала с размером частиц 3000–4000 мкм в 1,74

раза больше продолжительности расплавления материала с размером частиц 400–500 мкм.

**Таблица 2. Продолжительность перехода ЛПЭНП из твердого состояния в вязкотекущее в зависимости от размера частиц материала, мин**

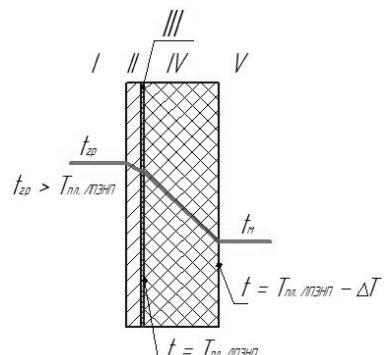
Показатель	Размер частиц полимерного материала, мкм			
	200-300	400-500	600-700	3000-4000
Продолжительность перехода, мин	15	23	30	40

Рассматривая особенности формования изделия методом ротационного формования, представлялось необходимым произвести теоретический расчет продолжительности нагрева ( $T_h$ ), необходимой для формообразования стенки изделия заданной толщины ( $\delta_m$ ). Причем провели расчет для ЛПЭНП с размером частиц 400–500 мкм и 3000–4000 мкм.

При расплавлении полимерного материала в ротационной форме (рис. 3), при передаче тепла от металлической формы полимерному материалу происходит образование тонкого вязкотекущего слоя полимера на поверхности формы. Переход оставшегося материала из твердого состояния в вязкотекущее происходит в результате передачи тепла от тонкого вязкотекущего слоя материала с температурой равной температуре плавления ЛПЭНП.

При расчете передачи тепла сделаем допущения:

- температура греющего агента равна температуре плавления ЛПЭНП ( $t_{\text{тр}} = T_{\text{пл.ЛПЭНП}}$ ),
- проводим расчет для материала массой 20 граммов.



**Рисунок 3. Схема теплопередачи: I - внешняя воздушная среда, II - металлическая стенка формы, III - первоначальный вязкотекущий слой полимера, IV - слой полимера, V - внутренняя среда формы.**

Для проведения расчета необходимо экспериментально определить насыпную плотность материалов (таблица 3).

Тепловую мощность, расходуемую на нагрев материала можно определить из уравнения теплового баланса [10]:

$$N = Q \cdot T = C_m \cdot m \cdot (t_{\text{мн}} - t_{\text{мк}}), \quad (3)$$

где  $Q$  – количество тепла, расходуемого на нагрев ЛПЭНП в единицу времени, переносимого через стенку формы и слой материала, Вт;  $T$  – продолжительность нагрева полимерного материала, с;  $C_m = 2,5 \text{ кДж/(кг·К)}$ , теплоемкость ЛПЭНП;  $m$  – масса полимера, кг;  $t_{\text{мн}} = 20^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{мк}} = 118^\circ\text{C}$  – начальная и конечная температура ЛПЭНП.

**Таблица 3. Зависимость насыпной плотности ЛПЭНП от размера его частиц.**

Показатель	Размер частиц ПМ, мкм	
	400-500	3000-4000
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	340	590

Используя уравнение (3) можно рассчитать продолжительность нагрева полимерного материала до требуемой температуры:

$$T = C_m \cdot m \cdot (t_{\text{мн}} - t_{\text{мк}}) / Q, \quad (4)$$

где  $m = V \cdot \rho_m$  – масса полимерного материала, кг;  $V$  – объем полимерного материала, м<sup>3</sup>;  $\rho_m$  – насыпная плотность ЛПЭНП, кг/м<sup>3</sup>.

Величина  $Q$  может быть рассчитана через уравнение теплопередачи [11]:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{\text{ср}}, \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·град);  $F$  – поверхность теплопередачи, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{\text{ср}}$  – средняя разность температур между двумя теплоносителями, град.

Подставив (5) в (4), получим продолжительность нагрева для ЛПЭНП толщиной 1 мм:

$$T = C_m \cdot \delta_m \cdot \rho_m \cdot (t_{\text{мн}} - t_{\text{мк}}) / (K \cdot \Delta t_{\text{ср}}) \quad (6)$$

Коэффициент термического сопротивления системы, можно определить из уравнения:

$$K = 11\alpha_1 + \delta_\phi \lambda_\phi + \delta_m \lambda_m + 1\alpha_2 = 10,6 \quad (7)$$

где  $\alpha_1 = 34,8$  Вт/(м<sup>2</sup>·град) – коэффициент теплоотдачи со стороны греющего агента;  $\alpha_2 = 16,2$  Вт/(м<sup>2</sup>·град) – коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха внутри формы;  $\delta_\phi = 2 \cdot 10^{-3}$  м – толщина стенки формы;  $\delta_m = 10^{-3}$  м, толщина стенки ЛПЭНП;  $\lambda_\phi = 46,5$  Вт/(м·град) – коэффициент теплопроводности стенки формы;  $\lambda_m = 0,25$  Вт/(м·град) – коэффициент теплопроводности ЛПЭНП.

Средняя разность температур определяется следующим образом:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \Delta t_h - \Delta t_k \ln \Delta t_h \Delta t_k = 59 \text{ К}, \quad (8)$$

где  $\Delta t_h = t_{\text{тр}} - t_{\text{мн}} = 121^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_k = t_{\text{тр}} - t_{\text{мк}} = 23^\circ\text{C}$ .

$\Delta t_h$ ,  $\Delta t_k$  – большая и меньшая разность температур на концах поверхности теплообмена;  $t_{\text{тр}} = 141^\circ\text{C}$  – температура расплавленного слоя ЛПЭНП [12].

Таким образом, подставив полученные значения в уравнение (6) получим продолжительность разогрева ( $T$ ) ЛПЭНП толщиной 1 мм:

- для материала размером 400–500 мкм,  $T = 2,2$  мин/мм,
- для материала размером 3000–4000 мкм,  $T = 3,9$  мин/мм.

Единицы измерения продолжительности нагрева материала приведены в мин/мм, то есть в расчете на 1 мм толщины стенки изделия с момента разогрева ротационной формы до рабочей температуры.

Анализируя полученные результаты можно отметить, что продолжительность расплавления материала с размером частиц 3000–4000 мкм в 1,77 раза больше продолжительности расплавления материала с размером частиц 400–500 мкм. Результаты расчета соответствуют результатам эксперимента представленным в таблице 2.

Теоретические выводы были проверены экспериментально. Суть эксперимента состояла в изготовлении изделий при одинаковой массе загрузки ротационной формы сырьем, формировании с варьированием продолжительности нагрева и измерения толщины стенки полученного изделия. После окончания процесса формования изделие разрезали, ссыпали нерасплавленный полимерный материал и измеряли толщину стенки изделия.

На рисунке 4 показана зависимость содержания нерасплавленной фракции порошка ЛПЭНП от продолжительности его нагрева.

Из рисунка 4 видно, что продолжительность перехода материала с размером частиц 400–500 мкм из твердого состояния в вязкотекучее составляет 2,1 мин/мм.

Таким образом, теоретическая и экспериментальная продолжительность нагрева материала составила 2,2 мин/мм и 2,1 мин/мм соответственно. Результаты расчета соответствуют результатам экспериментов.

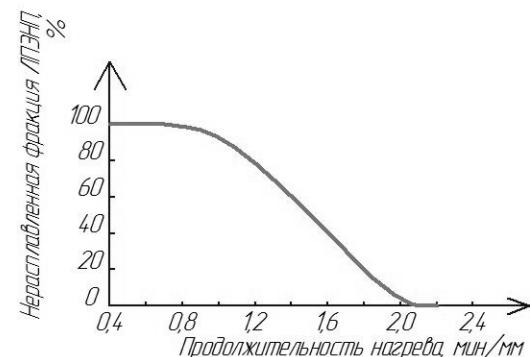


Рисунок 4. Зависимость содержания нерасплавленной фракции порошка ЛПЭНП (%) от продолжительности его нагрева (мин/мм).

Полученные результаты экспериментов позволяют рекомендовать оптимальную продолжительность нагрева ЛПЭНП с фракцией 500 мкм 2,1 мин/мм. Таким образом общая продолжительность нагрева материала с формой составляет:

$$T_h = T_1 + 2,1 \cdot h, \quad (9)$$

где  $T_1$  – продолжительность разогрева камеры нагрева до рабочей температуры 190°C, мин,  $h$  – толщина изделия, мм.

#### Влияние скорости вращения ротационной формы на перемещение частиц полимера

Поскольку ротационная форма вращается в двух плоскостях одновременно, полимерный материал внутри формы перемещается по сложной спиралевидной траектории. Полимер, находящийся внутри вращающейся формы, под действием силы тяжести прижимается к внутренней поверхности формы и отклоняется от горизонтали совместно с формой на угол  $\alpha$ , величина которого зависит от скорости вращения, радиуса формы и коэффициента трения материала [13]. После достижения предельного значения угла  $\alpha$  нарушается равновесие материала относительно поверхности формы, сдвигавшая сила становится больше силы трения и материал начинает перемещаться вниз. При этом в первое же мгновение исчезает действие на тело центробежной силы, в результате чего уменьшается сила трения и еще больше нарушается динамическое равновесие.

Для ротационного формования характерны невысокие частоты вращения ротационных форм, обычно 3–20 об/мин [14]. Определяющим фактором при РФ является действие силы тяжести, благодаря которой при вращении формы происходит распределение ПМ по внутренней поверхности стенки формы.

Определим угол подъема формы для выхода материала из состояния равновесия (рис. 5), при котором материал под действием силы тяжести выходит из состояния равновесия и начинает перемещаться по поверхности формы.

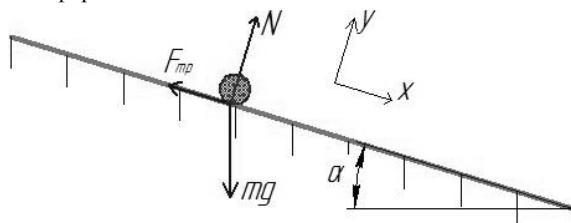


Рисунок 5. Угол подъема формы для выхода материала из состояния равновесия, где  $F_{\text{тр}}$  – сила трения,  $m_g$  – сила тяжести,  $N$  – реакция опоры.

$$\alpha = \arctg \mu, \quad (10)$$

$\mu$  – коэффициент трения ( $\mu = 0,2$  при трении ЛПЭНП о сталь,  $\mu = 0,4$  при трении ЛПЭНП о ЛПЭНП) [15];

$\alpha = 11,3^\circ$  при движении материала по стали,  $\alpha = 21,8^\circ$  при движении материала по полимерному материалу.

С целью подтверждения полученных результатов, образцы ЛПЭНП с размером частиц 200–300 мкм, 400–500 мкм, 3000–4000 мкм были исследованы на установке, представляющей собой металлическую нагреваемую пластину, угол наклона которой может изменяться (рис. 6).

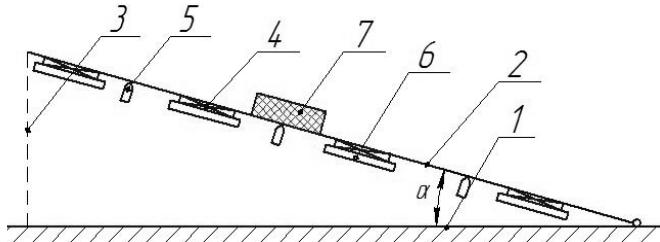


Рисунок 6. Установка для определения сыпучих свойств материалов. 1 – доска; 2 – металлическая нагреваемая пластина; 3 – регулятор высот; 4 – нагревательный элемент; 5 – термопара; 6 – фиксатор нагревательного элемента; 7 – прямоугольная рамка с материалом.

Исследования проводили при температурах 20–190°C, температурный интервал выбирали с учетом режимов, при которых перерабатывается ЛПЭНП методом ротационного формования [16].

Был определен угол подъема ротационной формы при котором происходит пересыпание ЛПЭНП. Результаты исследований приведены в таблице 4.

Из материалов, представленных в таблице 4, следует, что в условиях отсутствия нагрева угол перемещения порошкообразного и гранулированного материалов составляет 30 и 16° соответственно.

Таблица 4. Угол перемещения рамки с материалом в зависимости от температуры поверхности и размера частицы, градус.

Размер частиц ПМ, мкм	Температура металлической поверхности, °C				
	25	50	100	120	150
200-300	30	31	23	33	не движется
400-500	30	31	23	33	не движется
3000-4000	16	6	5	не движется	не движется

При увеличении температуры до 100°C значение угла перемещения уменьшается до 23 и 5° соответственно. Уменьшение угла перемещения материала при повышении температуры можно объяснить улучшением сыпучести. С учетом упрощения условий расчета, полученные результаты соответствуют теоретическим значениям, которые составляют 11,3° при движении материала по стали и 21,8° при движении материала по полимерному материалу.

#### Зависимость равнотолщинности изделий от скорости вращения ротационной формы

Получение качественного изделия методом РФ возможно только при выборе оптимальных скоростей вращения ротационной формы. Теоретически можно предположить, что при малых или чрезмерно высоких скоростях вращения формы будет наблюдаться отсутствие равнотолщинности стенок получаемого изделия. Равнотолщинность изделия можно достичь при оптимальных значениях скоростей вращения формы, когда будет достигнуто равенство линейной скорости вращения формы и перемещения материала.

Определим оптимальную скорость с которой материал будет перемещаться при подъеме стенки ротационной формы на угол  $\alpha$  (рис. 7).

$$N = mg \cdot \cos\alpha$$

$$F_{tp} = m_a = m \cdot V^2 / 2S$$

$m \cdot g \cdot \cos\alpha = m \cdot V^2 / 2S$ ,  $\mu \cdot g \cdot \cos\alpha = V^2 / 2S$ , при расчетах примем:

$$R = 1 \text{ м}, \mu = 0,2, \alpha = 11,3^\circ \text{C}.$$

$$S = 2 \cdot R^2 - 2 \cdot R^2 \cdot \cos\alpha = R^2(1 - \cos\alpha) = 0,19 \text{ м}$$

$$V = 2 \cdot S \cdot \mu \cdot \cos\alpha = 0,273 \text{ м/с} = 16,4 \text{ м/мин} \quad (11)$$

Для подтверждения расчетных данных проведены замеры толщины стенки изделий, полученных при различных скоростях вращения.

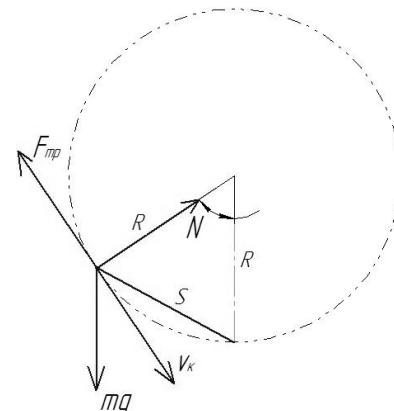


Рис. 7. Перемещение материала в основание формы.

На рис. 8 приведены результаты исследований зависимости равнотолщинности изделия от скоростей вращения формы. Графики построены с использованием экспериментально полученных данных при переработке разных марок ЛПЭНП.

Анализируя кривые зависимости разнотолщинности ( $\Delta h$ ) изделия от скоростей вращения формы ( $V$ ), представленной на рисунке, условно можно выделить три зоны [1]:

- I – зона малых скоростей вращения формы,
- II – зона оптимальных скоростей вращения формы,
- III – зона высоких скоростей вращения формы.

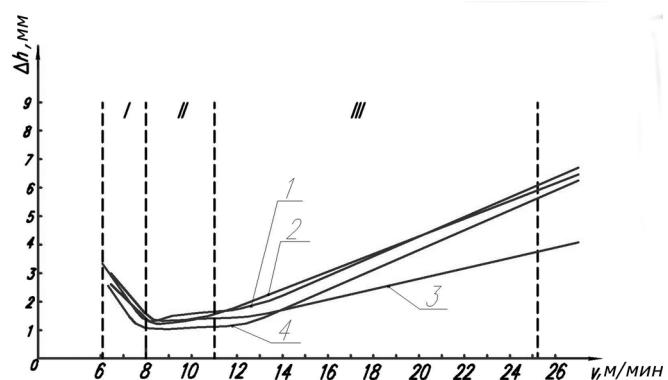


Рисунок 8. Зависимость разнотолщинности  $\Delta h$  (мм) изделия от скорости вращения формы  $V$  (м/мин) для ЛПЭНП различных марок: 1 - R50035E; 2 - RG 500U; 3 - UR 644; 4 - Dowlex [1].

Процессы формирования изделий в каждой из этих скоростных зон имеют свои особенности. Наименьшая разнотолщинность, являющаяся результатом несоосности формующей поверхности формы с осью вращения манипулятора, наблюдается во второй зоне при окружной скорости вращения формы равной 8 м/мин.

Анализируя данные, приведенные на рисунке, можно выделить диапазон окружных скоростей вращения формы для получения изделий с минимальной разнотолщинностью стенки изделия – от 7,5 до 11 м/мин.

Отклонение расчетного значения скорости вращения ротационной формы с материалом составившее 16,4 м/мин от экспериментального можно объяснить тем, что в проведенных расчетах не была учтена влажность материала, геометрия частичек порошка, послойное расплавление порошкообразного материала по слою материала в вязкотекучем состоянии.

Таким образом, комплексное изучение процессов теплопередачи и пластикации полимерного материала в отсутствии избыточного давления при одностороннем нагреве в ротационной форме, влияния размера частиц полимера на их распределение внутри ротационной формы и продолжительность нагрева, взаимосвязь скорости вращения формы и равнотолщинности получаемых изделий позволило определить оптимальные режимы формования изделий: продолжительность нагрева в зависимости от размера частиц и скорость вращения формы для линейного полиэтилена низкой плотности.

### Литература

1. Лавров, Н.А. О разнотолщинности изделий из полиэтилена, получаемых методом ротационного формования / Н.А. Лавров, М.С. Игуменов, К.С. Беседина // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). - 2010. - № 7 (33). - С. 37-38.
2. Дряхлов, Е. Материалы для ротационного формования // Эксперт оборудование. - 2003. - № 1 (73). С. 76-77.
3. Николаев А.Ф. Технология пластических масс. // Химия: Ленинградское отделение, 1977. - 368 с.
4. Лавров, Н.А. Полимерные материалы, перерабатываемые методом ротационного формования / Н.А. Лавров, М.С. Игуменов, К.С. Беседина // Энциклопедия инженера-химика. - 2011. - № 9. С. 9-12.
5. Клейман, С.Я. Роторная линия для ротационного формования изделий из пластических масс / С.Я. Клейман, Б.А. Голендер, Н.С. Лобода, У.С. Марсов, Л.М. Абрамов // Пластические массы. - 2011. - № 9. - С. 36-41.
6. Клейман, С.Я. Совершенствование оборудование для производства изделий методом ротационного формования / С.Я. Клейман, У.С. Марсов, Н.С. Лобода Б.А. Голендер // Пластические массы. - 1994. - № 2. - С. 77-79.
7. Лавров, Н.А. Комплексы ротационного формования / Н.А. Лавров, К.С. Беседина, М.С. Игуменов // Пластические массы. - 1991. - № 1. - С. 54-55.
8. Производство изделий из полимерных материалов: Учеб. пособие / В.К. Крыжановский [и др.] - СПб. : Профессия, 2004. - 464 с.
9. Игуменов, М.С. Разработка технологии производства сосудов высокого давления из полимерных композиционных материалов / М.С. Игуменов, Н.А. Лавров, К.С. Беседина // Сб. тезисов II научно-технической конференции молодых ученых "Неделя науки - 2012" СПбГТИ (ТУ) - СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2012. - С. 95.
10. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин - Москва, 1961. - 829 с.
11. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов [и др.] - Химия, 1970. - 624 с.
12. Лавров, Н.А. О режимах ротационного формования термопластов / Н.А. Лавров, М.С. Игуменов, И.В. Никитина, К.С. Беседина // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). - 2013. - № 18 (44). - С. 27-29.
13. Зенков, Р.Л. Механика насыпных грузов (основания расчета погружечно-разгрузочных и транспортных устройств) / Р.Л. Зенков. - 2-е изд., испр. и доп., - М. : Машиностроение, 1964. - 252 с.
14. Власов С.В. Основы технологии переработки пластмасс: учебник для вузов. // М.: Химия, 1995. - 528 с.
15. Крагельский, И.В. Коэффициенты трения: Справочное пособие. // Москва, 1962. - 223 с.
16. Свойства изделий из линейного полиэтилена низкой плотности, получаемых методом ротационного формования / Н.А. Лавров, М.С. Игуменов, К.С. Беседина, В.В. Кузьмин // Известия СПбГТИ(ТУ). - 2013. - № 20 (46). - С. 48-50.