

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ  
СДВИГОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ  
ПРОФИЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ ЗАДАННОГО КАЧЕСТВА**

**П.В. Макеев, А.С. Клинков, Д.Л. Полушкин, П.С. Беляев**

*Кафедра «Технология полиграфического и упаковочного производства»,  
ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; polymers@asp.tstu.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** валково-шнековый агрегат; переработка отходов; сдвиговая деформация.

**Аннотация:** Разработана методика расчета величины сдвиговой деформации при получении профильных изделий заданного качества на валково-шнековом агрегате.

---

При переработке отходов термопластов на качественные показатели получаемого вторичного термопластичного материала (прочности при разрыве, относительное удлинение при разрыве) определяющее влияние оказывает суммарная величина сдвига, возникающая в рабочих органах валково-шнекового агрегата [1, 2], которая зависит от различных технологических (частота вращения вала, частота вращения шнека, величина минимального зазора между валками, «запаса» материала на валках) и конструктивных параметров процесса.

Таким образом, была поставлена задача: определить такой параметр переработки отходов термопластов, характеризующий качественные показатели вторичного термопластичного материала, величина которого могла бы быть положена в основу при расчете конструктивных и технологических параметров валково-шнековых агрегатов.

Анализ литературных источников [3, 4] показал, что в основу такого параметра положена суммарная величина сдвига, возникающая в зазорах перерабатывающих машин.

Величина суммарного сдвига для валково-шнекового процесса утилизации отходов термопластов может быть представлена как алгебраическая сумма величин сдвига для непрерывного процесса вальцевания, продавливания вторичного материала через загрузочное отверстие, расположенное в неподвижном валке, деформирование полимера в винтовых каналах экструдера и суммарной величины сдвига, возникающей в профилирующих каналах формирующей кольцевой головки [5]

$$\gamma_{\text{сумм}} = \gamma_{\text{в}} + \gamma_{\text{з.о}} + \gamma_{\text{ш}} + \gamma_{\text{ф.г}}, \quad (1)$$

где  $\gamma_{\text{в}}$ ,  $\gamma_{\text{з.о}}$ ,  $\gamma_{\text{ш}}$ ,  $\gamma_{\text{ф.г}}$  – суммарные величины сдвига для непрерывного процесса вальцевания, в загрузочном отверстии, в каналах шнека, в формирующих каналах профилирующей кольцевой головки соответственно.

Суммарная величина сдвига, возникающая в межвалковом зазоре при переработке отходов термопластов на вальцах, у которых один валок является неподвижным (рис. 1), определяется по уравнению

$$\gamma_B = \frac{1}{l_B} \int_0^{l_B} \gamma_{\Pi} dl \quad (2)$$

где  $\gamma_{\Pi} = \bar{\gamma}i(t)$  – суммарная величина сдвига при периодическом режиме вальцевания на валково-шнековом агрегате;

$i(t) = \frac{U_0 t (1 + X_K^2)}{(X_K - X_H) \sqrt{2Rh_0}}$  – число

проходов;  $t$  – время вальцевания, с;  $U_0$  – средняя величина окружной скорости;  $U_0 = U_2$ , так как при переработке отходов термопластов на ваково-шнековом агрегате передний валок является неподвижным, следовательно,  $U_1 = 0$ , с<sup>-1</sup>;  $\bar{\gamma}$  – средняя удельная деформация сдвига, которой подвергается материал в процессе переработки на валково-шнековом агрегате, определяется выражением

$$\bar{\gamma} = \left\{ \begin{aligned} &0,75 \left[ 1 - (X_K^2) (\arctg X_K - \arctg X_H) + \frac{(1 + X_K^2) X_H - X_K^2}{1 + X_H^2} \right] \\ &\frac{0,5}{1 - 0,25(1 + X_K^2)} + \frac{0,5}{4(1 + X_K^2)} \left( \frac{X_K}{1 + X_K^2} - \frac{X_H}{1 + X_H^2} + \arctg X_K - \arctg X_H \right) \end{aligned} \right\} \times \\ \times \left[ \frac{1}{2\sqrt{2h_0^2(1 + X_K^2)}(X_K - X_H)} \right] \quad (3)$$

В процессе переработки материал с поверхности валков направляется в загрузочное отверстие (рис. 2), расположенное в зоне максимального давления.

Для расчета геометрических параметров загрузочного отверстия была предложена следующая методика.

Определяем площадь поперечного сечения загрузочного отверстия

$$F = \pi r^2, \quad (4)$$

где  $r$  – радиус загрузочного отверстия, м,

$$r = \frac{L(X_K)}{0,06 \left( \frac{R}{h_0} \right) \left[ g_2(X_K) \right]^2} \quad (5)$$

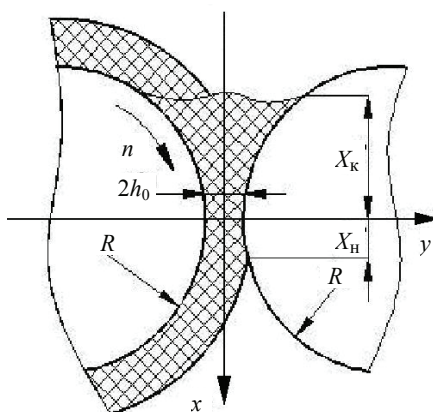


Рис. 1. Схема процесса вальцевания с одним неподвижным валком

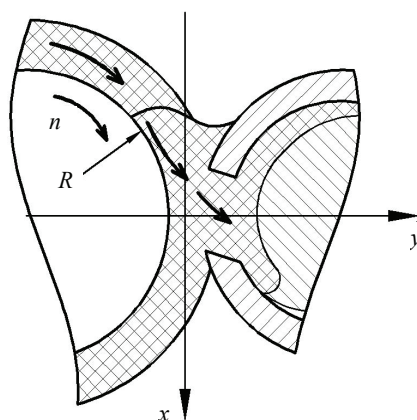


Рис. 2. Схема движения материала с поверхности валка в загрузочное отверстие винтового канала шнека

где  $L(X_K)$  – глубина загрузочного отверстия, рассчитывается в соответствии с прочностными характеристиками неподвижного вала;  $R$  – радиус вала, м;  $h_0$  – половина межвалкового зазора, м;  $X_H, X_K$  – безразмерные координаты входа и выхода материала соответственно.

Функция  $g_2(X_K)$  определяется следующим выражением

$$g_2(X_K) = \frac{X_K + X_H}{1 + X_H^2} \left[ X_H - X_K + 5X_K^3(1 + X_H^2) \right] + (1 - 3X_K^2)(X_K \operatorname{arctg} X_K - \operatorname{arctg} X_H). \quad (6)$$

Для продавливания материала через загрузочное отверстие необходимо выполнение следующего условия

$$P_{\max} \geq P_{3.0}. \quad (7)$$

Величина максимального давления определяется исходя из гидродинамической теории вальцевания следующим выражением

$$P_{\max} = \frac{5\mu_0 U^n}{h^n} \left( \frac{9R}{8h_0} \right)^2 X_K^3, \quad (8)$$

$h$  – расстояние от оси симметрии зазора до поверхности валков, м

$$h = h_0(1 + X_K^2) \quad (9)$$

Перепад давления в загрузочном отверстии рассчитываем по уравнению

$$P_{3.0} = \frac{Q\mu_0}{K_{\Pi}}, \quad (10)$$

где  $Q$  – производительность валково-шнекового агрегата, м<sup>3</sup>/с;  $K_{\Pi}$  – коэффициент геометрической формы, м<sup>3</sup>,

$$K_{\Pi} = \frac{\pi d^4}{128L}. \quad (11)$$

После предварительных расчетов было предложено два варианта загрузочного отверстия: круглое и прямоугольное.

Далее были проведены экспериментальные исследования по определению производительности с каждым типом загрузочного отверстия, и сделан сравнительный анализ.

Из графической зависимости (рис. 3) видно, что максимальная производительность наблюдается при круглом поперечном сечении загрузочного отверстия при прочих равных условиях. Следовательно, дальнейшие эксперименты проводились с круглым типом загрузочного отверстия.

Величина сдвига в загрузочном отверстии определяется следующим выражением

$$\gamma_{3.0} = \dot{\gamma}\tau, \quad (12)$$

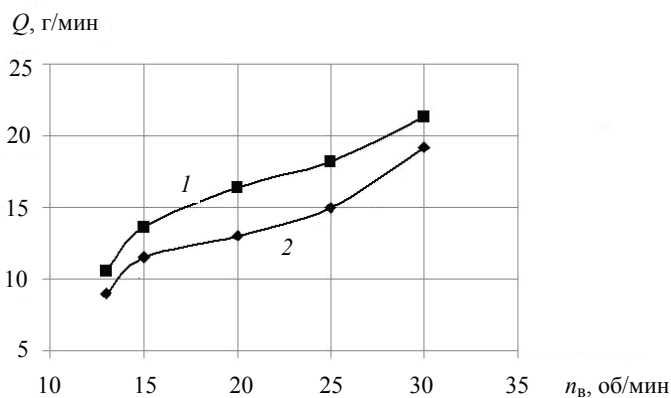


Рис. 3. Зависимость производительности от формы загрузочного отверстия:  
1 – круглое; 2 – прямоугольное

где  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\tau$  – время пребывания материала в загрузочном отверстии, с,

$$\dot{\gamma} = \frac{32Q}{\pi d^3}, \quad (13)$$

где  $d$  – диаметр загрузочного отверстия, м;

$$\tau = \frac{FL}{Q}, \quad (14)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения загрузочного отверстия,  $\text{м}^2$ .

Далее материал с поверхности валков вальцов через загрузочное отверстие направляется в винтовой канал шнека, расположенный в неподвижном валке. Таким образом, дальнейшая переработка представляет собой процесс экструзии, о качестве которого можно судить также по суммарной величине сдвига в винтовых каналах шнека  $\gamma_{ш}$  и трубной головке  $\gamma_{ф.г.}$ , которая представляет собой функцию различных конструктивных параметров шнека, формирующих каналов профилирующей кольцевой головки и технологических параметров процесса экструзии.

Суммарная величина сдвига в каналах шнека определяется следующим образом

$$\gamma_{ш} = \dot{\gamma}_p \tau_{ш}, \quad (15)$$

где  $\dot{\gamma}_p$  – расчетная скорость сдвига в каналах шнека,  $\text{с}^{-1}$ ,

$$\dot{\gamma}_p = \frac{0,5D\omega \left( \frac{1}{n} + 1 \right)}{h}; \quad (16)$$

$\tau_{ш}$  – время пребывания перерабатываемого материала в материальном цилиндре, с,

$$\tau_{ш} = \frac{WhL}{Q \sin \varphi}, \quad (17)$$

где  $W = (t - e) \cos \varphi$  – ширина винтового канала шнека, м;  $n$  – индекс течения;  $\omega$  – угловая скорость шнека,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\varphi$  – угол наклона винтовой нарезки шнека;  $L$  – длина нарезной части шнека, м;  $h$  – глубина винтового канала шнека, м.

Величина суммарного сдвига в формирующих каналах трубной головки (рис. 4) определяется следующим образом

$$\gamma_{\text{ф.г}} = \sum_{i=1}^n \gamma_{\text{фи}}, \quad (18)$$

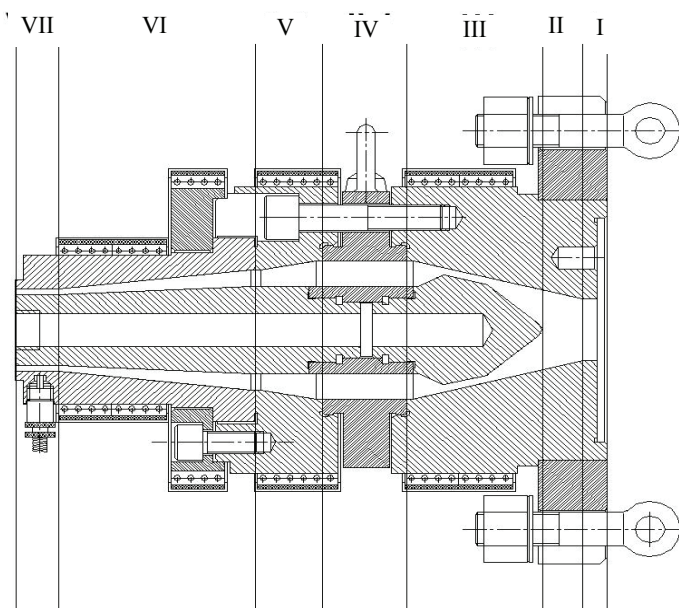
где  $\gamma_{\text{фи}} = \dot{\gamma}_i \tau_{\text{фи}}; \tau_{\text{фи}} = \frac{F_i l_i}{Q_i}$ ;  $\dot{\gamma}_i; \tau_{\text{фи}}$  – сдвиг, скорость сдвига, время пребывания перерабатываемого материала в  $i$ -м канале соответственно;  $F_i, l_i, Q_i$  – площадь поперечного сечения, длина и производительность  $i$ -го канала соответственно.

Для расчета суммарной величины сдвига в трубной головке разобьем ее на зоны по видам каналов (см. рис. 4).

Для каждого вида канала рассчитаем величину сдвига:

$$\gamma_{\text{ф.ц}} = \frac{32Q}{\pi d_{\text{ц}}^3} \frac{F_{\text{ц}} l_{\text{ц}}}{Q}; \quad (19)$$

$$\gamma_{\text{ф.кон}} = \frac{256Q}{\pi(D+d)^3} \frac{F_{\text{кон}} l_{\text{кон}}}{Q}; \quad (20)$$



**Рис. 4. Схема трубной головки по видам каналов:**

I – цилиндрический; II – конический;  
III, V, VI – конический кольцевой; IV, VII – кольцевой

$$\gamma_{\text{ф.кол}} = \frac{5,58Q}{\pi(R_{\text{H}} + R_{\text{B}})} \frac{1}{(R_{\text{H}} - R_{\text{B}})^2} \frac{F_{\text{кол}} l_{\text{кол}}}{Q}; \quad (21)$$

$$\gamma_{\text{ф.к.к}} = \frac{22,32Q}{\pi(R_0 + R_1)} \frac{1}{(\delta_1 + \delta_2)^2} \frac{F_{\text{к.к}} l_{\text{к.к}}}{Q}; \quad (22)$$

$$\gamma_{\text{ф.г}} = \gamma_{\text{ф.ц}} + \gamma_{\text{ф.кон}} + 3\gamma_{\text{ф.кол}} + 2\gamma_{\text{ф.к.к}}. \quad (23)$$

Таким образом, решение уравнения (1) совместно с (2), (11), (15), (22) позволяет определить величину суммарного сдвига для процесса валково-шнековой утилизации термопластичных полимерных материалов с получением профильного изделия – трубки.

Проведенные экспериментальные исследования на валково-шнековом агрегате с формующей головкой кольцевого типа и наружным диаметром 0,01 м позволили получить трубку из отходов полиэтилена высокого давления с высокими физико-механическими показателями  $\sigma_T = 12...14$  МПа,  $\varepsilon = 700-850$  % при расчетной величине сдвиговой деформации  $\gamma_{\text{сумм}} = 3200$ .

#### *Список литературы*

1. Торнер, Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р.В. Торнер. – М. : Химия, 1977. – 464с.
2. Мак-Келви, Д.М. Переработка полимеров : пер. с англ. / Д.М. Мак-Келви. – М. : Химия, 1965. – 442 с.
3. Автоматизированное проектирование валковых машин для переработки полимерных материалов : монография / А.С. Клинков [и др.]. – М. : Машиностроение-1, 2005. – 320 с.
4. Проектирование экструзионных машин с учетом качества резинотехнических изделий : учеб. пособие / М.В. Соколов [и др.]. – М. : Машиностроение-1, 2007 – 292 с.
5. Пат. 2417881 Российская Федерация, МПК С2 В 29 В 7/64. Валково-шнековый агрегат / Клинков А.С., Макеев П.В., Соколов М.В., Полушкин Д.Л., Однолюк В.Г. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2009100295/05 ; заявл. 11.01.2009 ; опубл. 20.07.2010, Бюл. № 20. – 4 с.

---

### **Calculation Technique for Shear Deformation in Obtaining Profile Products of Specified Quality**

**P.V. Makeev, A.S. Klinkov, D.L. Polushkin, P.S. Belyaev**

*Department "Technology of Printing and Packaging Industry", TSTU;  
polymers@asp.tstu.ru*

**Key words and phrases:** roller-screw unit; recycling of waste; shear deformation.

**Abstract:** The paper presents the technique of calculating shear deformation in obtaining profile products of a specified quality on a roller-screw unit.

## **Methodik der Berechnung der Größe der Schiebedeformierung bei dem Erhalten der Profilerzeugnissen der eingestellten Qualität**

**Zusammenfassung:** Es ist die Methodik der Berechnung der Größe der Schiebedeformierung bei dem Erhalten der Profilerzeugnissen der eingestellten Qualität am Walzschneckenaggregat erarbeitet.

---

## **Méthode du calcul de la grandeur de la déformation du déplacement lors de l'obtention des articles profilés de la qualité donnée**

**Résumé:** Est élaborée la méthode du calcul de la déformation du déplacement lors de l'obtention des articles profilés de la qualité donnée sur une machine de roulement et de limace.

---

**Авторы:** *Макеев Павел Владимирович* – аспирант кафедры «Технология полиграфического и упаковочного производства»; *Клишков Алексей Степанович* – кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология полиграфического и упаковочного производства»; *Полушкин Дмитрий Леонидович* – кандидат технических наук, старший преподаватель, исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Технология полиграфического и упаковочного производства»; *Беляев Павел Серафимович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология полиграфического и упаковочного производства», проректор по учебно-инновационной деятельности, ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Соколов Михаил Владимирович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения, металло-режущие станки и инструменты», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---