

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ КАЧЕСТВА ПРОДУКТА В РАБОЧИХ ЗОНАХ ДУХРОТОРНЫХ СМЕСИТЕЛЕЙ

С.С. Гуреев¹, А.С. Клинков¹, В.Г. Однолько²

*Кафедры: «Технология полиграфии и упаковочное производство» (1),
«Конструкции зданий и сооружений» (2), ГОУ ВПО «ТГТУ»;
polymers@asp.tstu.ru*

Представлена членом редколлегии профессором Н.Ц. Гатаповой

Ключевые слова и фразы: двухроторный смеситель; качественный показатель; смесительный эффект; смешение; суммарная величина сдвига.

Аннотация: Выведена зависимость для расчета суммарной деформации сдвига для процесса смешения и диспергирования в двухроторных смесителях, позволяющая оценить качество получаемого композита.

Установлено, что на качественные показатели получаемого модифицированного первичного или вторичного термопластичного материала (прочность при разрыве, относительное удлинение при разрыве) определяющее влияние оказывает сдвиговая деформация, возникающая в рабочих органах смесителя. Она зависит от различных конструктивных (геометрические размеры смесителя и его рабочих органов) и технологических (частота вращения роторов смесителя, фрикция, температура внутри смесительной камеры) параметров процесса смешения и диспергирования [1].

По данным источника [2], уравнение для определения скоростей сдвига может быть записано в виде

$$\dot{\gamma} = \frac{U}{h} \left(1 + \frac{6}{h^2} \left(\frac{h}{2} - \frac{h_B m}{2m+1} \right) (h - 2y) \right). \quad (1)$$

Для нахождения деформации сдвига, возникающей в смешиваемом материале за все время процесса и приходящейся на единицу длины ротора, необходимо данное уравнение проинтегрировать по h и y и умножить на время процесса смешения t

$$\gamma = t \int_{h_0}^{h_B} \int_0^h \frac{U}{h} \left(1 + \frac{6}{h^2} \left(\frac{h}{2} - \frac{h_B m}{2m+1} \right) (h - 2y) \right) dy dh. \quad (2)$$

Данная формула не зависит от длины дуги захвата, в результате чего дает неточное значение деформации сдвига. Чтобы получить необходимый результат выразим h через длину проекции дуги захвата на стенку камеры l_B , и будем интегрировать по длине l (рис. 1)



Рис. 1. Геометрическая схема деформации эффективного объема материала

$$h = h_B - l \frac{h_B - h_0}{l_B}. \quad (3)$$

Тогда, подставляя выражение (3) в выражение (1) и интегрируя полученную формулу по l и по y , получим выражение для нахождения деформации сдвига γ в эффективном объеме

$$\gamma = t \int_0^{l_B} \int_0^h \frac{U}{h_B - l \frac{h_B - h_0}{l_B}} \left(1 + \frac{6}{\left(h_B - l \frac{h_B - h_0}{l_B} \right)^2} \left(\frac{1}{2} \left(h_B - l \frac{h_B - h_0}{l_B} \right) - \frac{h_B m}{2m + 1} \right) \times \right. \\ \left. \times \left(h_B - l \frac{h_B - h_0}{l_B} - 2y \right) \right) dy dl. \quad (4)$$

Данная теория не учитывает действия продольной составляющей деформации. Чтобы ее учесть, необходимо представить развертку ротора относительно горизонтальной плоскости стенки камеры (рис. 2).

На лопастях ротора происходят идентичные процессы, поэтому будем рассматривать только одну лопасть. Представим развертку лопасти в двух проекциях, отображающих пространство, заключенное между поверхностью лопасти и поверхностью стенки камеры, которая после развертывания будет представлять собой плоскость (рис. 3, а). С целью сохранения неподвижности системы координат относительно гребня ротора будем считать гребень неподвижным, а стенку камеры – движущейся со скоростью U (рассматривается обратная задача) (рис. 3, б).

Данную систему можно разбить на три зоны (см. рис. 3, а). В области, которая находится после гребня лопасти, деформации являются незначительными и ими можно пренебречь.

Зона 1 (см. рис. 3, а). В данном случае направление воздействия деформаций на материал перпендикулярно ребру гребня ротора, поэтому для удобства решения данной задачи ее можно разделить на две более простые. В первой задаче стенка камеры будет двигаться вдоль оси x со скоростью U , во второй – вдоль оси z (оси вращения ротора) в направлении, перпендикулярном оси x , со скоростью

$U_z = \frac{U}{\text{tg}\alpha_z}$ (рис. 4). Следовательно, общая деформация будет находиться как

сумма взаимоперпендикулярных векторов $U_{\text{общ}} = \sqrt{U^2 + U_z^2}$.

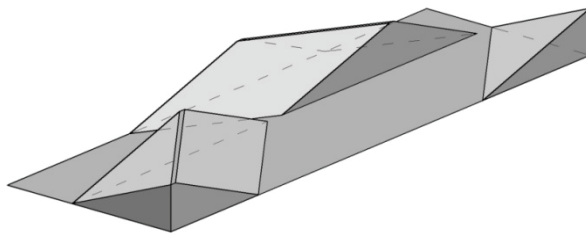


Рис. 2. Развертка двухлопастного ротора

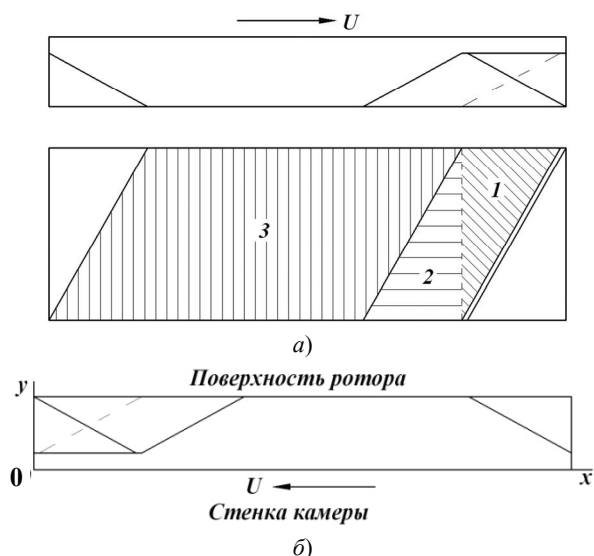


Рис. 3. Развертка лопасти ротора:

a – 2 вида (1, 2, 3 – зоны деформирования материала); *б* – схема обращенной задачи

Каждая из предложенных задач представляет собой расчет деформации сдвига, описанный ранее выражением (4). В данном случае необходимо учитывать не только изменение высоты h вдоль оси x , но также изменение длины l_B вдоль оси z , из чего следует, что необходимо провести интегрирование выражения (1) еще и по l_z .

В результате для деформации вдоль оси x получим

$$\gamma = t \int_0^{l_{zB}} \int_0^{l_B} \int_0^h \left[\frac{U}{h} \left(1 + \frac{6}{h^2} \left(\frac{h}{2} - \frac{h_B - \frac{l_z(h_B - h_0)}{l_{zB}} m}{2m+1} \right) (h - 2y) \right) \right] dy dl dl_z, \quad (5)$$

где $h = h_B - \frac{l_z(h_B - h_0)}{l_{zB}} - \frac{l}{(l_{zB} - l_z) \operatorname{tg} \alpha_z} \left(h_B - \frac{l_z(h_B - h_0)}{l_{zB}} - h_0 \right)$; $l_B = l_z \operatorname{tg} \alpha_z$; l_{zB} – длина лопасти, мм; α_z – угол наклона винтовой линии.

В случае движения стенки камеры вдоль оси z необходимо учитывать изменение высоты h вдоль оси z , изменение длины l_z вдоль оси x , из чего следует, что необходимо провести интегрирование выражения (1) по y , l_z и l

$$\gamma_z = t \int_0^{l_B} \int_0^{l_{zB}} \int_0^h \left[\frac{U_z}{h_z} \left(1 + \frac{6}{h_z^2} \left(\frac{h_z}{2} - \frac{h_B - lm \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1}}{2m+1} \right) (h_z - 2y) \right) \right] dy dl dl_z, \quad (6)$$

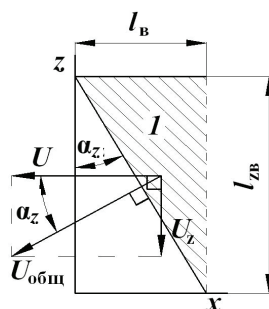


Рис. 4. Геометрическая схема зоны I

$$\text{где } h_z = h_B - l \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1} - \frac{l_z \operatorname{tg} \alpha_z \left(h_B - l \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1} - h_0 \right)}{l_B - l}; \quad l_{zB} = \frac{l}{\operatorname{tg} \alpha_z}.$$

Результирующая суммарная деформация сдвига в данной зоне находится по формуле

$$\gamma_{\text{общ}} = \sqrt{\gamma^2 + \gamma_z^2}. \quad (7)$$

Чтобы получить среднее значение суммарной деформации сдвига, приходящейся на единицу объема, необходимо значение, полученное в выражении (7), разделить на объем, занимаемый данной зоной. Фигура, объем которой необходимо найти, представляет собой пятигранник (рис. 5).

Одна из сторон пятигранника представляет собой прямоугольную трапецию $KLMN$, площадь которой легко определить

$$S_1 = 0,5ML(KL + MN). \quad (8)$$

Для нахождения объема данной фигуры воспользуемся интегрированием выражения (8) по l_{zB} , при этом учтем, что большее основание трапеции и высота будут меняться и выразим их через h_B и l_z соответственно. В результате получим выражение для нахождения объема (см. рис. 5), занимаемого зоной l

$$V_1 = \int_0^{l_{zB}} 0,5(l_{zB} - l_z) \operatorname{tg} \alpha_z \left(h_0 + h_B - \frac{l_z(h_B - h_0)}{l_{zB}} \right) dl_z. \quad (9)$$

Разделив выражение (7) на выражение (9), получим окончательную формулу для нахождения суммарной деформации сдвига в данной зоне

$$\gamma_1 = \frac{\sqrt{\gamma^2 + \gamma_z^2}}{V_1}. \quad (10)$$

Зона 2 (см. рис. 3, а). В данном случае будет решаться только первая задача из предыдущих двух, так как материал в этой зоне подвергается деформации только в направлении вращения. В результате выводов получим следующее выражение

$$\gamma_g = t \int_0^{l_{gB}} \int_0^{l_B} \int_0^h \left[\frac{U}{h} \left(1 + \frac{6}{h^2} \left(\frac{h}{2} - \frac{h_B m}{2m+1} \right) (h - 2y) \right) \right] dy dl dl_g, \quad (11)$$

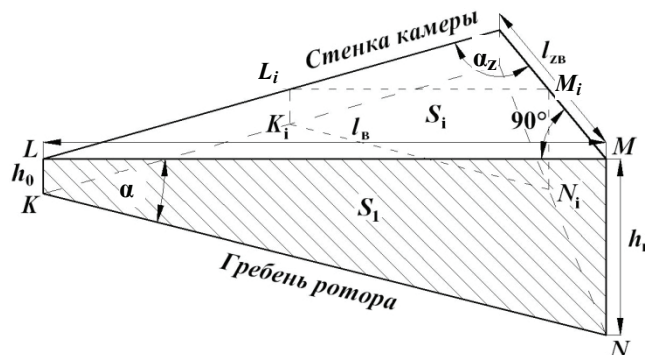


Рис. 5. Геометрическое изображение эффективного объема первой зоны деформирования

где $l_B = (l_{gB} - l_g) \operatorname{tg} \alpha_z$; $h = h_B - \frac{l(h_B - h_0)}{l_B}$.

Геометрическое отличие данной зоны состоит в том, что высота на входе будет постоянной $h_B = \text{const}$, а минимальный зазор h_0 будет меняться от минимального значения до величины высоты на входе h_B (рис. 6).

Для данной зоны получим следующие равенства:

$$V_2 = \int_0^{l_{gB}} 0,5(l_{gB} - l_g) \operatorname{tg} \alpha_z \left(2h_B - (l_{gB} - l_g) \operatorname{tg} \alpha_z \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1} \right) dl_g; \quad (12)$$

$$\dot{\gamma}_2 = \frac{\dot{\gamma}_g}{V_2}. \quad (13)$$

Зона 3 (см. рис. 3, а). Деформирование материала в этой зоне описывается теорией изотермического движения жидкости, находящейся в кольцевом зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами. Оценка смесительного воздействия на полимерный материал (рис. 7) была рассмотрена в работах [3, 4].

Величина скорости сдвига вычисляется по формуле

$$\dot{\gamma} = \frac{2U}{nR \left(1 - \beta^{\frac{2}{n}} \right)}. \quad (14)$$

где U – окружная скорость внутреннего цилиндра, мм/с; R – радиус внутреннего цилиндра, мм; $\beta = \frac{RH}{R}$ – отношение радиуса внешнего цилиндра к радиусу внутреннего цилиндра; n – индекс течения расплава.

Суммарная величина смесительного воздействия, которому подвергается материал в зазоре между цилиндрами за время t , определяется формулой [1]

$$\dot{\gamma}_3 = \frac{2Ut}{nR \left(1 - \beta^{\frac{2}{n}} \right)}, \quad (15)$$

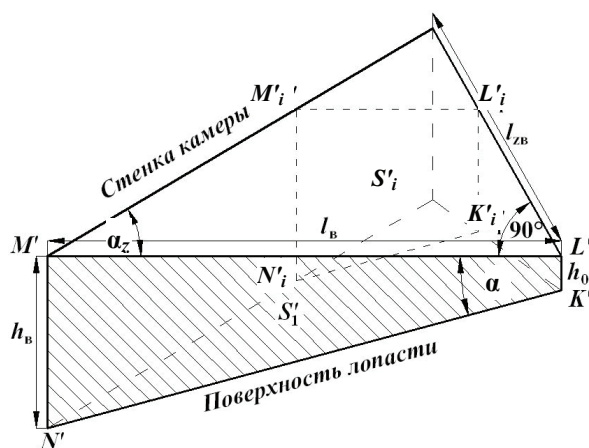


Рис. 6. Геометрическое изображение эффективного объема второй зоны деформирования

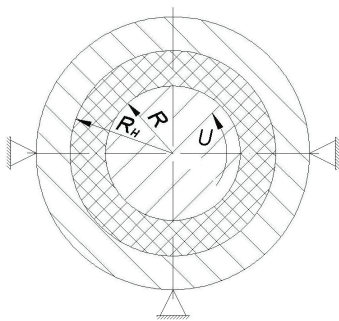


Рис. 7. Схема установившегося изотермического течения жидкости между двумя коаксиальными цилиндрами

Величина суммарной деформации сдвига на всей длине лопасти будет равна

$$\gamma_{L1} = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3. \quad (16)$$

Для второй лопасти ротора вычисления будут идентичными

$$\gamma'_{L1} = \gamma'_1 + \gamma'_2 + \gamma_3. \quad (17)$$

Чтобы найти деформацию, приходящуюся на всю длину двухлопастного ротора, необходимо учитывать относительный объемный расход материала, приходящийся на каждую лопасть. Для этого введем коэффициенты

$$p = \frac{l'_{zB}}{l_{r0}} \text{ и } p' = \frac{l'_{zB}}{l_{r0}}, \text{ где } l_{zB} - \text{длина первой лопасти, мм; } l'_{zB} - \text{длина второй лопасти, мм; } l_{r0} - \text{длина ротора, мм.}$$

В результате получим

$$\gamma_{p1} = p\gamma_{L1} + p'\gamma'_{L1}. \quad (18)$$

Выражение для нахождения деформации сдвига, возникающей в смешиваемой композиции на втором роторе,

$$\gamma_{p2} = p\gamma_{L2} + p'\gamma'_{L2}. \quad (19)$$

В итоге, величина суммарной деформации сдвига, действующей на материал во время процесса смешения и диспергирования во всем объеме смесительной камеры, будет находиться по следующему равенству

$$\gamma_{\text{сум}} = q(\gamma_{p1} + \gamma_{p2}), \quad (20)$$

где q – коэффициент, учитывающий объемный расход, приходящийся на каждый ротор, и перекрытие зон деформации.

В качестве примера была решена задача по определению интегрального критерия качества для смешения вторичного полиэтилена низкой плотности марки ВПВД с техническим углеродом К-354 в роторном смесителе РСВД-45. Характеристики первичного ПЭВД 15803-020: плотность $\rho = 0,919 \text{ г/см}^3$; индекс течения $m = 0,3$; показатель текучести расплава $I = 2,0 \text{ г/10 мин}$; предел текучести при растяжении $\sigma_T = 9,5 \text{ МПа}$; прочность при разрыве $\sigma_p = 11,5 \text{ МПа}$; относительное удлинение при разрыве $\epsilon = 600 \%$.

Наилучшие физико-механические показатели полученного композита: $I = 1,469 \text{ г/10 мин}$; $\sigma_T = 14,29 \text{ МПа}$; $\sigma_p = 15,1 \text{ МПа}$; $\epsilon = 612,5 \%$ – были получены при значении интегрального критерия качества смеси $\gamma_{\text{сум}} = 1644,34$ и следующих параметрах процесса: фрикция $f = 1,5$; частота вращения $n = 20 \text{ об/мин}$; время смешения $t = 60 \text{ с}$; температура смеси $T = 130 \text{ }^\circ\text{C}$; процентное содержание технического углерода $C = 0,05 \%$.

Работа выполнена в рамках ФЦП № 14.740.11.0141 по теме «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области многофункционального приборостроения для промышленных систем управления».

Список литературы

1. Гуреев, С.С. Методика определения интегрального критерия качества в зонах деформации смесительных устройств / С.С. Гуреев, А.С. Клинков // Вест. Тамб. гос. техн. ун-т. – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 905–909.
2. Смещение полимеров / Богданов В.В., [и др.]. – Л. : Химия, 1979. – 192 с.
3. Мак-Келви, Д.М. Переработка полимеров : пер. с англ. / Д.М. Мак-Келви. – М. : Химия, 1965. – 442 с.
4. Торнер, Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р.В. Торнер. – М. : Химия, 1977. – 464 с.
5. Применение интегральных критериев качества при переработке полимерных материалов валково-шнековым методом / А.С. Клинков [и др.] // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 870–881.
6. Методология расчета оборудования для производства длинномерных резинотехнических заготовок заданного качества / М.В. Соколов [и др.]. – М. : Машиностроение, 2009. – 352 с.

Identification of Integral Quality Criterion of Product in the Working Zones of Double Rotary Mixers

S.S. Gureev¹, A.S. Klinkov¹, V.G. Odnolko²

Departments: "Processing of Polymers and Packaging" (1), «Construction of Buildings and Structures» (2), TSTU; polymers@asp.tstu.ru

Key words and phrases: double rotary mixer; mixing effect; mixing; qualitative index; total value of the shear.

Abstract: The paper presents the calculation technique for the dependence total shear deformation for mixing and dispersion processes in the double rotary mixer; it enables to evaluate the quality of the obtained composite.

Bestimmung des Integralkriteriums der Produktqualität in den Arbeitszonen der Doppelrotormischer

Zusammenfassung: Es ist die Abhängigkeit für die Berechnung der summarischen Deformation der Verschiebung für das Prozess der Mischung und des Disperhieren in den Doppelrotormischern gefolgert. Sie erlaubt die Qualität des erhaltenden Komposites einzuschätzen.

Définition du critère intégral de la qualité du produit dans les zones de travail des mélangeurs de deux rotors

Résumé: Est déduite la dépendance pour le calcul de la déformation du décalage pour le processus du mélange et de la dispersion dans les mélangeurs de deux rotors permettant d'évaluer la qualité du composite reçu.

Авторы: *Гуреев Сергей Сергеевич* – соискатель кафедры «Технология полиграфии и упаковочное производство»; *Клинков Алексей Степанович* – кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология полиграфии и упаковочное производство»; *Однолько Валерий Григорьевич* – кандидат технических наук, профессор кафедры «Конструкции зданий и сооружений», декан факультета «Заочное обучение и экстернат», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Попов Николай Сергеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Природопользование и защита окружающей среды», ГОУ ВПО «ТГТУ».