

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
МНОГОСЕКЦИОННОГО ЭКСТРУДЕРА
СО СМЕШИВАЮЩЕЙ СЕКЦИЕЙ С ПЛАСТИНАМИ
ИНТЕНСИФИКАЦИИ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**

© А. В. Колесников¹✉

¹ *Кафедра «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии»,
angeykan@mail.ru, ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет
имени Владимира Даля», Луганск, Российская Федерация*

Ключевые слова: имитационная модель; многосекционный шнек; сдвиговые деформации, скорость сдвига; смешивающая секция; толщина полос компонентов; экструдер.

Аннотация: Представлена конструкция многосекционного экструдера со смешивающей секцией с пластинами интенсификации сдвиговых деформаций. Получена методика оценки смесительных способностей смешивающей секции с пластинами интенсификации сдвиговых деформаций. Проведена оценка качества работы предложенной конструкции смешивающей секции методом имитационного моделирования. Дано сравнение смешивающей секцией с пластинами интенсификации сдвиговых деформаций с конической секцией.

Введение

Мировое изготовление полимерных материалов в начале XX века составляло всего несколько тысяч тонн их разнообразных типов. В сравнении с традиционными материалами для конструкций – стеклом, металлом, цементом – это был очень небольшой процент [1, 2]. В настоящее время передовые страны мира ежегодно производят полимерной продукции по объему существенно больше, чем стали, а уж тем более цветных металлах, вместе взятых. Мировая динамика развития изготовления пластмасс такова, что с каждым годом прирост производства полимерного сырья происходит с увеличивающейся скоростью, а выпуск металлов, напротив, постоянен. В 2024 году было произведено 163 700 тыс. т разнообразных полимерных материалов.

Представленные факты динамики производства полимеров определяют также их планомерный выход из строя после окончания срока использования, который в отличие от многих материалов составляет зачастую достаточно небольшой период, например, если речь идет об упаковке пищевых продуктов. Как следствие, образование достаточно большого объема полимерных отходов, которые зачастую при сортировке образуют смесь различных полимеров – комбинированное вторичное сырье [3, 4]. Переработка такого сырья достаточно затруднительна при использовании классических схем переработки, даже в случае подготовки смеси, включающей помимо вторичного комбинированного полимерного сырья первичный полимер и наполнители. Основной проблемой является низкое качество получаемой продукции из такого сырья ввиду недостаточных смесительных способ-

ностей экструзионного оборудования, применяемого как основная составляющая во многих процессах переработки [5].

Для решения этих проблем предложено использовать многосекционные конструкции шнековых узлов со смешивающими секциями специальной конструкции, обеспечивающими высокую степень распределения компонентов в процессе переработки [6]. Как следствие, изделие, сформованное из сырья, прошедшего более качественную переработку при экструзии, будет обладать улучшенными прочностными характеристиками.

Ввиду новизны идеи применения многосекционных шнековых конструкций со смешивающими секциями для переработки вторичных комбинированных полимерных материалов определение конструкции смешивающей секции и показателей ее работы является актуальной задачей.

Усовершенствование конструкции экструдера секцией с пластинами интенсификации сдвиговых деформаций

Основным минусом известных конструктивных решений исполнения классических экструдеров (с цилиндрическим или коническим шнеком), а также имеющих насадки либо зоны дегазации является то, что в случае использования разнородного вторичного полимерного сырья, включающего вторичное, первичное сырье, наполнители, красители и другие компоненты, необходимые для подготовленной вторичной полимерной смеси, требуется комплекс дорогостоящего технологического оборудования для вспомогательной подготовки исходного сырья (пластификаторы, смесители, пресса, грануляторы). Засыпание же в экструдер с классическими конструкциями шнека неподготовленного сырья на выходе не позволяет получить вторичной изделие хорошего качества из-за ограниченных смесительных способностей базовых конструкций.

Предлагается новое конструктивное исполнение многосекционного экструдера, задачей которого является усовершенствование оборудования благодаря новой конструкции шнека в зоне сжатия [7].

Предлагаемый экструдер включает корпуса, захватное устройство 2, шнек 3, исполненный в форме сборной конструкции (рис. 1). Корпус включает зоны питания 4, сжатия 5, дозирования 6. В машину входит ряд функциональных зон и секций: зона питания 4 имеет вид конической секции; зона сжатия 5 включает смешивающую секцию с пластинами интенсификации сдвиговых деформаций 7 и секцию декомпрессии 8; зона дозирования включает коническую 9 и цилиндрическую 10 секции.

На рисунке 2 приведена смешивающая секция с пластинами интенсификации сдвиговых деформаций, которая оснащена в виде барьерного элемента интенсификации сдвиговых деформаций пластинами 1, расположенными перпендикулярно шнеку 2. В процессе переработки вторичная полимерная смесь перемещается из входного канала твердого состояния 3 в выходной канал вязкотекучего состояния 4 через зазор между гребнем пластины и гребнем витка 5, а также через зазор между торцевой поверхностью пластины и торцевой поверхностью витка 6.

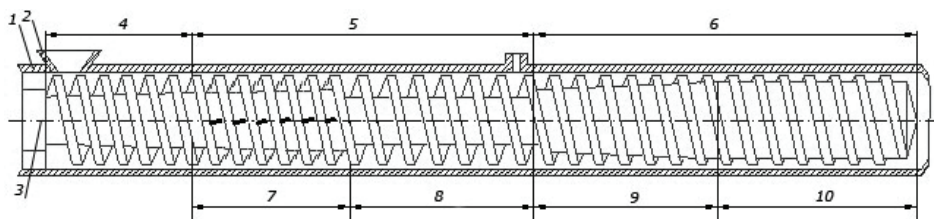


Рис. 1. Экструдер с многосекционным шнеком, оснащенный секцией с пластинами интенсификации сдвиговых деформаций

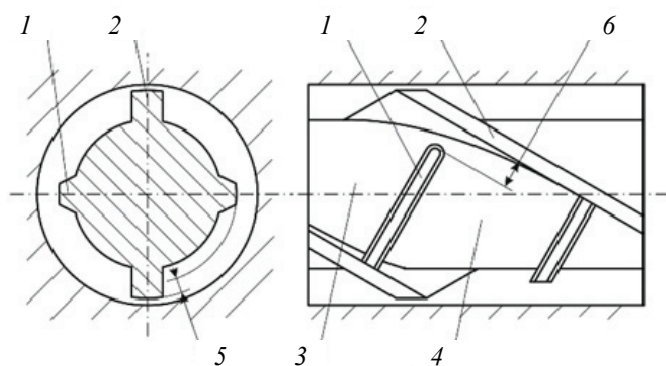


Рис. 2. Конструкция смешивающей секции с пластинами интенсификации сдвиговых деформаций

Предложенный экструдер (см. рис. 1) исходя из многосекционности шнекового узла производит переработку вторичного сырья следующим образом: различные компоненты полимерной смеси поставляются индивидуальными дозаторами в бункер 2, захватываются многосекционным шнеком 3, вращающимся в корпусе 1, в твердом виде смесь перемещается и уплотняется в зоне питания 4, далее в зоне сжатия 5 смешивающая секция с пластинами интенсификации сдвиговых деформаций 7 обеспечивает равномерное перемещение, расплавление и равномерную по всему объему температуру смеси. Секция декомпрессии 8 в той же зоне выполняет задачу дегазации расплава, зона дозирования 6 формирует стабильное значение давления и производительности аппарата благодаря конической 9 и цилиндрической 10 секций.

Таким образом, задача предлагаемой смешивающей секции – улучшение качества получаемых новых изделий из вторичного полимерного сырья основным методом непрерывной экструзионной переработки, позволяющим сочетать ряд затратных вспомогательных операций, таких как предварительное смешивание и гранулирование.

Методика оценки смесительных способностей смешивающей секции с пластинами интенсификации сдвиговых деформаций

Смешение компонентов высоковязкого полимерного расплава представляется следствием деформации сдвига, в результате которой возникает увеличение поверхности раздела компонентов и преобразование первоначального их распределения в случайное неупорядоченное.

Перемешивающее воздействие сдвига реализуется в вытягивание частиц ключевого компонента в полосы все сокращающейся толщины.

Согласно методикам Мора, достаточно удобной мерой значения неоднородности представляется средняя толщина полос r – среднее значение расстояния между микрослоями компонентов в системе многокомпонентной вязкотекучей жидкости [8].

В случае течения материала в экструдере будем рассматривать двухмерную деформацию сдвига, тогда значение средней толщины полос r будет равно

$$r = \frac{r_0}{[\varepsilon(\Gamma_z + \Gamma_x)]}, \quad (1)$$

где Γ_z – деформация сдвига, направленная вдоль канала шнека; Γ_x – деформация сдвига, направленная в поперечном направлении; r_0 – начальная средняя толщина полос до деформации; ε – концентрация ключевого компонента.

В результате анализа течения расплава в зоне пластин интенсификации сдвиговых деформаций получено выражение для скорости перетекания расплава через пластину

$$v_l = \frac{-3y^2 \pi D N \sin \varphi}{2eh^2} \left[W_{o.в} \left(1 - \frac{\delta}{h} \right) + \left(\frac{\pi D}{\operatorname{tg} \varphi} + e \right) \right], \quad (2)$$

где y – переменная координата по высоте пластины; D – диаметр шнека; N – частота вращения шнека; φ – угол подъема винтовой линии; h – глубина винтового канала; e – ширина витка; $W_{o.в}$ – ширина канала основного витка; δ – зазор между гребнем основного витка и цилиндром.

Так как векторы линейной скорости и скорости сдвига имеют одинаковые направления, как в продольном, так и в поперечном направлении, то анализ смесительных способностей секции будем проводить на основании деформирования сдвига в плоскости yol (рис. 3).

С учетом эпюры скоростей v_l характерные координаты по высоте канала течения равны: $y_1 = \delta_6$; $y_2 = 0$, где δ_6 – зазор между пластиной и цилиндром.

Значение скорости сдвига

$$\dot{\gamma}_l = \frac{\delta v_l}{\delta y} = \frac{-3y \pi D N \sin \varphi}{eh^2} \left[W_{o.в} \left(1 - \frac{\delta}{h} \right) + \frac{\pi D}{\operatorname{tg} \varphi} + e \right] \quad (3)$$

усредняется по высоте канала

$$\bar{\dot{\gamma}}_l = \frac{-3\delta_6 \pi D N \sin \varphi}{2eh^2} \left[W_{o.в} \left(1 - \frac{\delta}{h} \right) + \frac{\pi D}{\operatorname{tg} \varphi} + e \right]. \quad (4)$$

Средняя деформация сдвига $\bar{\Gamma}_l$ равна

$$\bar{\Gamma}_l = \bar{\dot{\gamma}}_l t, \quad (5)$$

где t – среднее время пребывания частиц в зоне гребня пластины, равное

$$t = \frac{e_6}{\bar{v}_l}, \quad (6)$$

где \bar{v}_l – средняя интегральная скорость потока в смешивающей секции в плоскости yol , рассчитывается по формуле

$$\bar{v}_l = \frac{-\delta_6^2 \pi D N \sin \varphi}{2eh^2} \left[W_{o.в} \left(1 - \frac{\delta}{h} \right) + \left(\frac{\pi D}{\operatorname{tg} \varphi} + e \right) \right]. \quad (7)$$

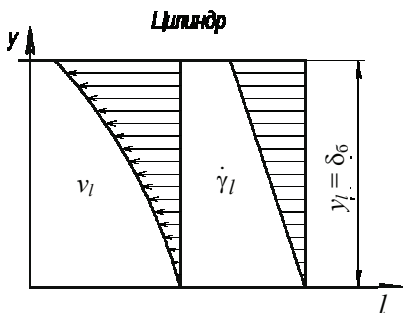


Рис. 3. Эпюры линейных скоростей и скоростей сдвига для зазора пластины в направлении оси шнека в смешивающей секции экструдера

Полученное выражение $\bar{\Gamma}_l$ позволяет рассчитать толщину полос на выходе из смешивающей секции экструдера. Преобразуя выражение (1) под условия деформирования в смешивающей секции, получим

$$r = \frac{r_0}{\varepsilon \Gamma_l}. \quad (8)$$

Из вышеизложенного следует, что качество смешения в смешивающей секции экструдера с многосекционным шнеком зависит от ширины гребня основного и пластины, зазора пластины, диаметра шнека, глубины канала, угла подъема винтовой линии и режима работы, изменяя которые можно регулировать результат процесса.

Имитационное моделирование работы смешивающей секции с пластинами интенсификации сдвиговых деформаций

Построена программа имитационного моделирования работы конструкций экструзионных агрегатов. Расчет на модели позволяет построить распределения скоростей течения в канале экструдера; распределения сдвиговых деформаций микрослоев компонентов вязкой полимерной смеси при течении в канале экструдера; динамику изменения по длине шнека толщины полос микрослоев компонентов вязкой полимерной смеси [9].

Основные исходные данные работы имитационной модели приведены в табл. 1.

В результате проведения экспериментов на имитационной модели получены эпюры линейных скоростей и скоростей сдвига в смешивающей секции на пластинах интенсификации сдвиговых деформаций (рис. 4).

На рисунке 5 представлено графическое сравнение толщины полос компонентов смеси для предложенной смешивающей секции и классической конической конструкции шнека по длине L_i .

Таблица 1

Исходные параметры моделирования экструдера со смешивающей секцией с пластинами интенсификации сдвиговых деформаций

Наименование параметра	Обозначение	Значение
<i>Геометрические размеры экструдера</i>		
Рабочая длина шнека, мм	L	600
Диаметр шнека, мм	D	20
Зазор между цилиндром и гребнем витка шнека, мм	z	0,083
Шаг витка шнека экструдера, мм	t	20
Ширина гребня основного витка шнека экструдера, мм	e_g	3
<i>Геометрические размеры смешивающей секцией с пластинами интенсификации сдвиговых деформаций</i>		
Длина смешивающей секции экструдера, мм	L_b	160
Глубина канала в конце смешивающей секции, мм	H_{2b}	2,5
Ширина пластины в смешивающей секции, мм	e_b	2
Зазор между цилиндром и пластиной, мм	z_b	1

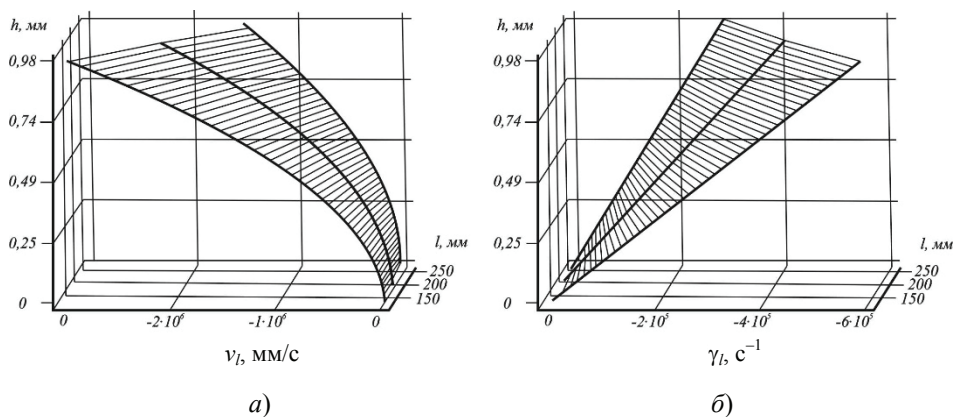


Рис. 4. Эпюры линейных скоростей (а) и скоростей сдвига (б) в смешивающей секции

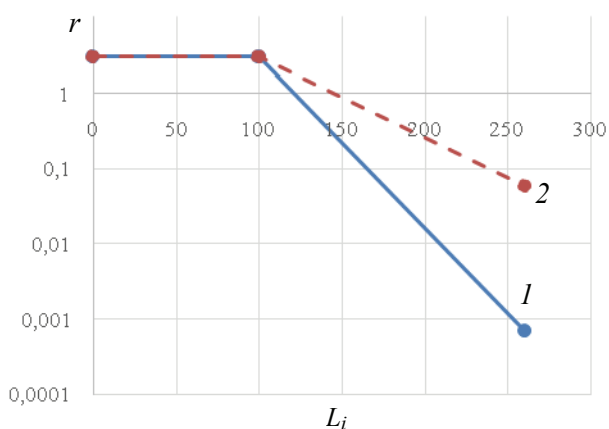


Рис. 5. Сравнение смешивающих характеристик предложенной конструкции секции (1) и конической (2)

В результате численного сравнения значений толщины полос компонентов у предложенной смешивающей секции с пластинами интенсификации сдвиговых деформаций значение показателя составило на $0,06$ мм меньше, чем у аналога, что позволяет сделать вывод о возможности использования предложенной конструкции для переработки вторичной разнородной полимерной смеси.

Заключение

Таким образом, в работе представлена конструкция смешивающей секцией с пластинами интенсификации сдвиговых деформаций в составе экструдера с многосекционным шнеком для переработки вторичных разнородных полимерных материалов, получена методика оценки смесительных характеристик данной секции, а также проведено имитационное моделирование работы секции. В результате численной сравнительной оценки смесительных способностей разработанной смешивающей секции с шириной пластин $e_b = 2$ мм и зазором между цилиндром и пластиной $z_b = 1$ мм с конической секцией отмечено улучшение значения толщины полос компонентов на $0,06$ мм, что дает возможность использовать предложенную секцию как смешивающую при переработке вторичных разнородных полимерных материалов.

Список литературы

1. Каган, Д. Ф. Многослойные и комбинированные пленочные материалы / Д. Ф. Каган, В. Е. Гуль, Л. Д. Самарина. – Москва : Химия, 1989. – 288 с.
2. Малицкова, Е. А. Переработка отходов пластмасс / Е. А. Малицкова, И. И. Потапов. – Москва : Авис Оригинал, 1997. – 159 с.
3. Калиновская, Г. Д. Пути переработки отходов слоистых пластиков / Г. Д. Калиновская. – Ленинград : Химия, 1997. – 94 с.
4. Rauwendaal, C. Polymer Extrusion / C. Rauwendaal. – Munich etc. : Hauser Snarduer, 2004. – 777 p.
5. Мак-Келви, Д. М. Переработка полимеров / Д. М. Мак-Келви ; пер. с англ. Ю. В. Зеленева [и др.]. – Москва : Химия, 1965. – 442 с.
6. Суханов, П. П. Анализ многокомпонентных полимерных систем методами ЯМР: олигомер-полимерные и фазовые превращения : монография / П. П. Суханов. – Казань : КГТУ, 2007. – 292 с.
7. Патент на полезную модель № 167227 Российская Федерация. Экструдер для переработки разнородных отходов вторичных полимерных материалов : № 2016117040 : заявл. 28.04.2016 : опубл. 08.12.2016 / Дядичев В. В., Колесников А. В., Дядичев А. В. ; патентообладатель ООО «Интелком».
8. Ким, В. С. Диспергирование и смешение в процессах производства пластмасс / В. С. Ким. – Москва : Химия, 1988. – 293 с.
9. Колесников, А. В. Математическая модель процессов смешения и диспергирования разнородных вторичных полимерных материалов в экструдере / А. В. Колесников // Информационные системы и технологии в моделировании и управлении : сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, Ялта, 24–25 мая 2022 г. – Симферополь : Ариал, 2022. – С. 118–121.

A Study of Characteristics of a Multi-Section Extruder Featuring a Mixing Section with Shear-Intensification Plates

© A. V. Kolesnikov¹✉

¹ *Department of Automation and Computer-Integrated Technologies,
angeykv@mail.ru, Vladimir Dahl Lugansk State University,
Lugansk, Russian Federation*

Keywords: simulation model; multi-section screw; shear deformations, shear rate; mixing section; component strip thickness; extruder.

Abstract: The design of a multi-section extruder with a mixing section featuring shear-intensification plates is presented. A methodology for evaluating the mixing capabilities of the mixing section with shear-intensification plates is developed. The performance of the proposed mixing section design was assessed using simulation modeling. A comparison of the mixing section with shear intensification plates and a conical section was provided.

References

1. Kagan D.F., Gul V.E., Samarina L.D. *Mnogosloynnye i kombinirovannyye plenochnyye materialy* [Multilayer and Combined Film Materials], Moscow: Chemistry, 1989, 288 p. (In Russ.)
2. Malitskova E.A., Potapov I.I. *Pererabotka otkhodov plastmass* [Plastic Waste Recycling]. Moscow: Avis Original, 1997, 159 p. (In Russ.)

3. Kalinovskaya G.D. *Puti pererabotki otkhodov sloistykh plastikov* [Laminated Plastic Waste Recycling], Leningrad: Chemistry, 1997, 94 p. (In Russ.)
 4. Rauwendaal C. *Polymer Extrusion*, Munich etc.: Hauser Cnarduer, 2004, 777 p.
 5. McKelvey D. *Pererabotka polimerov* [Polymer Processing]. Moscow: Chemistry, 1965, 368 p. (In Russ.)
 6. Sukhanov P.P. *Analiz mnogokomponentnykh polimernykh sistem metodami YAMR: oligomer-polimernyye i fazovyye prevrashcheniya: monografiya* [Analysis of multicomponent polymer systems by NMR methods: oligomer-polymer and phase transformations: monograph], Kazan: KSTU, 2007, 292 p. (In Russ.)
 7. Dyadichev V.V., Kolesnikov A.V., Dyadichev A.V. *Ekstruder dlya pererabotki raznorodnykh otkhodov vtorichnykh polimernykh materialov* [Extruder for processing heterogeneous waste of secondary polymeric materials], Russian Federation, 2016, Utility Model Patent No. 167227 (In Russ.)
 8. Kim V.S. *Dispergirovaniye i smesheniye v protsessakh proizvodstva plastmass* [Dispersion and Mixing in Plastics Production Processes], Moscow: Chemistry, 1988, 293 p. (In Russ.)
 9. Kolesnikov A.V. *Informatsionnyye sistemy i tekhnologii v modelirovanii i upravlenii: sbornik materialov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Information Systems and Technologies in Modeling and Control: Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference], Yalta, May 24-25, 2022, Simferopol: Arial Publishing House, 2022, pp. 118-121. (In Russ., abstract in Eng.)
-

Untersuchung der Eigenschaften des mehrteiligen Extruders mit Mischabschnitt mit Scherverstärkungsplatten

Zusammenfassung: Es ist die Konstruktion eines mehrteiligen Extruders vorgestellt, dessen Mischabschnitt mit Scherverstärkungsplatten ausgestattet ist. Es ist eine Methode zur Bewertung der Mischleistung dieses Mischabschnitts entwickelt. Die Leistungsfähigkeit des vorgeschlagenen Mischabschnitts ist mittels Simulationsmodellierung bewertet. Es ist der Vergleich des Mischabschnitts mit Scherverstärkungsplatten und eines konischen Abschnitts präsentiert.

Étude des caractéristiques d'un extracteur multi-sections avec une section de mélange avec des plaques d'intensité de cisaillement

Résumé: Est présentée la conception de l'extrudeuse à plusieurs sections avec une section de mélange avec des plaques d'intensification des déformations de cisaillement. Est obtenue la méthode d'évaluation des capacités de mélange de la section de mélange avec des plaques d'intensification des déformations de cisaillement. La qualité de la conception proposée de la section de mélange est évaluée par la simulation. Est donnée la comparaison de la section de mélange avec une plaque d'intensification des déformations de cisaillement avec la section conique.

Автор: *Колесников Андрей Валерьевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии», ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля», Луганск, Россия.