

Г. С. Подыман^{а}, Я. Г. Двойнос^а, В. А. Новик^б*

*^аНациональный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского”, Киев, Украина
^бООО “Механика”, Киев, Украина*

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОМОГЕНИЗАЦИИ ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ В ОДНОШНЕКОВОМ ЭКСТРУДЕРЕ С ПЕРЕМЕШИВАЮЩИМ ЭЛЕМЕНТОМ МЭДДОКА¹

H. S. Podyman^{}, Ya. H. Dvoinos, and V. A. Novik*

MODELING THE HOMOGENIZATION PROCESS OF POLYETHYLENE COMPOSITIONS IN A SINGLE-SCREW EXTRUDER WITH A MADDOCK MIXING ELEMENT

Keywords: extruder screw, Maddock mixing element, polyethylene composition, mathematical model

The work aims to generalize the existing theoretical studies into the influence of geometrical dimensions of the Maddock element installed on the extruder screw on the mixing quality of polyethylene composition with a silicone rubber in order, to establish the theoretical laws of the process and to verify them experimentally. A mathematical model of the flow of polymer melts in the working gaps of a single-screw extruder with a Maddock mixing element is formulated. Numerical and simulation experiments were carried out, a technological scheme for producing a composition for an antifriction layer of protective tubes of fiber optic communication cables is proposed, and samples of the new composition were obtained.

Ключевые слова: шнек экструдера, элемент Мэддока перемешивающий, композиция полиэтилена, модель математическая

Цель работы — обобщение имеющихся результатов теоретических исследований влияния геометрических размеров элемента Мэддока, установленного на шнек экструдера, на качество

*Автор, с которым следует вести переписку: podiman_g_s@ukr.net
Corresponding author: podiman_g_s@ukr.net

¹Перевод с англ.

перемешивания полиэтиленовой композиции с силиконовым каучуком, установление теоретических закономерностей процесса и их экспериментальная проверка. Сформулированы граничные условия для математической модели течения расплава полимера в рабочих зазорах одношнекового экструдера с перемешивающим элементом Мэддока. Проведены численные и имитационные эксперименты, предложена технологическая схема получения композиции для антифрикционного слоя защитных труб волоконно-оптических кабелей связи и получены образцы новой композиции.

Введение

Композиция полиэтилена с силиконовым каучуком имеет низкий коэффициент трения, делающий ее пригодной для изготовления антифрикционного слоя защитных трубок для волоконно-оптических кабелей связи. В соответствии с требованиями [1] к монтажу и испытанию систем трубопроводов в земле (включая трубы и трубопроводную арматуру) для защиты и прокладки изолированных проводов и/или кабелей в системах связи и с монтажными требованиями (“натягивание” (“tightening”) или “длина хода” (“stoke”) [2] коэффициент трения внутренней поверхности защитной трубки и внешней оболочки кабеля должен быть меньше 0,1. Такой коэффициент трения позволяет прокладывать оптические кабели легкой конструкции инжекторным методом на расстояние до 2000 м. Для обеспечения допустимых значений коэффициента трения на Украине применяют и такие известные современные технологии, как прокладка (продувка) пневмокабелей с помощью смазочных материалов Plumettaz CJL 1032 (Швейцария) [3] и Prelube-5000 (США) (0,4—0,5 дм³/км) [4], использование двухслойных труб с внутренним слоем, изготовленным путем экструзии полиэтиленовых концентратов с первичными амидами жирных кислот (добавка D10-1061 Combo [5]) или смеси полиэтилен—силиконовый каучук (Dow Corning MB25-035 [6]). Включение силиконового каучука в композицию полиэтилена стабилизирует ее характеристики, поскольку высокомолекулярный силиконовый каучук не растворяется в полиэтилене и соответственно не проникает в стенку трубки, а коэффициент трения меньше подвержен влиянию температуры.

Традиционное оборудование для изготовления композиции полиэтилен—силикон — экструдер с двумя шнеками, вращающимися в противоположных направлениях [7]. Для повышения однородности и дисперсности получаемой композиции необходима значительная модернизация их производства с использованием одношнекового экструдера. Возможности смешивания с помощью простых шнеков ограничены, и для интенсификации процессов смешивания и диспергирования используют разные перемешивающие элементы [8, 9], среди которых наиболее известны перемешивающие шнеки Мэддока, Drew и CRD.

В [10] методами математического моделирования исследовали влияние геометрических параметров блочного смесителя на характеристики (па-

раметры режима) процесса экструзии, такие как перепад давления и диссипация энергии. Распределительное перемешивание в каналах элемента оценивали по времени обработки и сдвиговому напряжению. Результаты исследования могут служить рекомендациями по проектированию и оптимизации геометрии перемешивающих элементов.

В [11, 12] провели численное моделирование течения полимерных расплавов (неньютоновских жидкостей) в канале перемешивающего элемента Мэддока [12] и барьерного шнека [11], по конструкции аналогичного элементу Мэддока. Рассмотрен процесс течения в набегающем и пригоночном зазорах. С помощью программы ANSYS Polyflow реконструирована постановка граничных условий и реологических параметров расплава в широком диапазоне температур и скоростей сдвига. Авторы использовали современные компьютерные технологии и протестировали серию имитационных экспериментов для разных условий с целью получения конкретных решений.

Цель настоящей работы — разработка методики расчета параметров перемешивания и перегрева композиций полиэтилена с силиконовым каучуком при заданных параметрах и геометрических размерах элемента Мэддока в ходе одношнекового экструдирования; проверка адекватности метода натуральных экспериментов; оценка влияния определяющих размеров перемешивающего элемента Мэддока на качество перемешивания, перегрев расплава и перепад давления; предоставление рекомендаций по проектированию элемента Мэддока. Толщину рабочих зазоров и их длину выбрали в качестве определяющих геометрических параметров элемента.

1. Математическая модель течения композиций расплавов в рабочих зазорах элемента Мэддока

Конструкция шнека с элементом Мэддока и геометрические параметры элемента показаны на рис. 1. Элемент Мэддока имеет шесть входных и шесть выходных каналов. Он расположен после зоны плавления и дозирования, а расплав поступает во входные зазоры элемента под давлением.

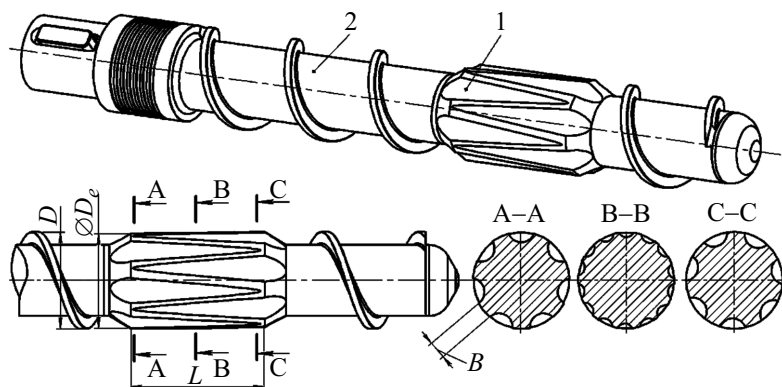


Рис. 1. Шнек (1) с элементом Мэддока (2); L — длина элемента; D — диаметр цилиндров одношнекового экструдера; D_e — диаметр выступающих поверхностей элемента Мэддока; B — ширина зазора между каналами элемента Мэддока.

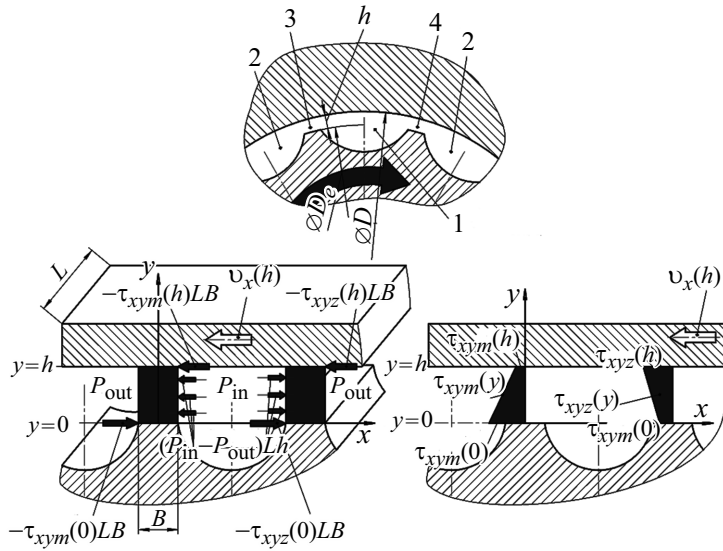


Рис. 2. Параметры геометрии и режима элемента Мэддока в плоскопараллельной модели: 1 и 2 — входной и выходной каналы (низкого давления) соответственно; 3 и 4 — набегающий и убегающий зазоры соответственно.

Поскольку высота зазора $h = (-D_e)/2$ мала (по сравнению с диаметром цилиндра D), использовали плоскопараллельную модель течения расплава в зазорах элемента с неподвижным элементом Мэддока ($v_x(0) = 0$) и верхней стенкой, движущейся вдоль оси x с постоянной линейной скоростью $v_x(h) = \pi Df$, где f — скорость шнека экструдера (рис. 2).

При использовании плоскопараллельной модели для исследования течения расплава через элемент Мэддока предположили следующее:

— ширина зазора B постоянна вдоль каналов, а длина каждого радиального зазора равна длине L элемента Мэддока;

— гидравлическое сопротивление в каналах элемента Мэддока незначительно по сравнению с гидравлическим сопротивлением в рабочих зазорах и не учитывается;

— течение расплава в рабочих зазорах происходит только в тангенциальном направлении (по координате x , см. рис. 2), а силы инерции намного меньше сил вязкого трения и не учитываются;

— реологические свойства композиции расплава полиэтилена с силиконовым каучуком не зависят от эффективного размера включений дисперсной фазы;

— реологическое поведение расплава можно описать степенным законом Оствальда—де Ваэля

$$\tau_{xy} = K \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy},$$

где τ_{xy} — касательное напряжение; K — коэффициент консистенции расплава композиции;

— скольжение расплава по стенкам рабочих зазоров отсутствует.

При изучении течения расплава через зазоры элемента Мэддока использовали следующие обозначения: зазор с поверхностью элемента Мэддока относительно подвижной в направлении входного канала (с более высоким давлением) назван набегающим (incident) и обозначен нижним индексом m , а радиальный зазор с относительным перемещением элемента Мэддока против направления входного канала назван пригоночным (coinciding) и обозначен нижним индексом z .

В набегающем зазоре для элемента расплава шириной B , длиной L и высотой h уравнение баланса действующих сил запишем в виде [13]

$$-\tau_{xym}(0)BL - (P_{in} - P_{out})Lh + \tau_{xym}(h)BL = 0, \quad (1)$$

где $\Delta P = (P_{in} - P_{out})$ — перепад давления между напорным и безнапорным каналами (гидравлическое сопротивление элемента); $\tau_{xym}(h)$ и $\tau_{xym}(0)$ и $\tau_{xym}(y)$ — касательные напряжения, действующие в элементе расплава в зазорах в непосредственной близости от верхней (подвижной) и нижней (неподвижной) стенок канала соответственно и на высоте y от нижней (неподвижной) стенки канала.

Ответ на увеличение зазора —

$$\begin{aligned} &-\tau_{xyz}(0)BL + (P_{in} - P_{out})Lh + \tau_{xyz}(h)BL = 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow &-\tau_{xyz}(h) = -\tau_{xyz}(0) + \Delta P \frac{h}{B}, \quad \tau_{xyz}(y) = \tau_{xyz}(0) - \frac{\Delta P}{B}y. \end{aligned} \quad (2)$$

Используя реологическое соотношение Оствальда—де Ваэля, скорость сдвига (градиент расхода) для набегающего и пригоночного зазоров запишем как

$$\frac{dv_{xm}(y)}{dy} = \frac{1}{K} \left| \tau_{xym}(0) + \Delta P \frac{y}{B} \right|^{\frac{1}{n}-1} \left(\tau_{xym}(0) + \Delta P \frac{y}{B} \right), \quad (3)$$

$$\frac{dv_{xz}(y)}{dy} = \frac{1}{K} \left| \tau_{xyz}(0) - \Delta P \frac{y}{B} \right|^{\frac{1}{n}-1} \left(\tau_{xyz}(0) - \Delta P \frac{y}{B} \right), \quad (4)$$

$$v_{xm}(y) = \int_{y=0}^{y=y} \left[\frac{1}{K} \left| \tau_{xym}(0) + \Delta P \frac{y}{B} \right|^{\frac{1}{n}-1} \left(\tau_{xym}(0) + \Delta P \frac{y}{B} \right) \right] dy, \quad (5)$$

$$v_{xz}(y) = \int_{y=0}^{y=y} \left[\frac{1}{K} \left| \tau_{xyz}(0) - \Delta P \frac{y}{B} \right|^{\frac{1}{n}-1} \left(\tau_{xyz}(0) - \Delta P \frac{y}{B} \right) \right] dy. \quad (6)$$

Предельные условия для скорости течения расплава в зазорах на нижней и верхней стенках имеют вид

$$v_{xm}(0) = v_{xz}(0) = 0, \quad v_{xm}(h) = v_{xz}(h) = -\pi Df. \quad (7)$$

Объемные скорости потока в рабочих зазорах вычисляем как

$$Q_m = L \int_{y=0}^{y=h} v_{xm}(y) dy = L \int_{y=0}^{y=h} \left[\int_{y=0}^{y=y} \left(\frac{1}{K} \left| \tau_{xym}(0) + \Delta P \frac{y}{B} \right|^{\frac{1}{n}-1} \left(\tau_{xym}(0) + \Delta P \frac{y}{B} \right) \right) dy \right] dy,$$

$$Q_z = L \int_{y=0}^{y=h} v_{xz}(y) dy = L \int_{y=0}^{y=h} \left[\int_{y=0}^{y=y} \left(\frac{1}{K} \left| \tau_{xyz}(0) - \Delta P \frac{y}{B} \right|^{\frac{1}{n}-1} \left(\tau_{xyz}(0) - \Delta P \frac{y}{B} \right) \right) dy \right] dy.$$

Сумма левых частей этих интегральных уравнений определяется известным значением производительности экструдера из уравнения (5):

$$Q_m + Q_z = \frac{G}{z_{in} \rho}, \quad (8)$$

где G — производительность экструдера; ρ — плотность расплава.

Уравнения (5)—(8) содержат три неизвестных параметра: $\tau_{xym}(0)$, $\tau_{xyz}(0)$, ΔP . Система закрытая и имеет уникальное решение.

Среднюю скорость сдвига в рабочих зазорах для определения кажущейся вязкости расплава можно определить с помощью уравнения

$$\gamma_{ave} = \frac{1}{h} \int_0^h \sqrt{\gamma_{xym}^2(y) + \gamma_{xyz}^2(y)} dy, \quad (9)$$

где $\gamma_{xym}(y) = dv_{xm}(y)/dy$ — скорость сдвига в набегающем зазоре элемента Мэддока; $\gamma_{xyz}(y) = dv_{xz}(y)/dy$ — скорость сдвига в пригоночном зазоре элемента Мэддока.

Среднее время обработки расплава в зазорах элемента Мэддока равно

$$t_{ave} = \frac{LBh\rho z_{in}}{G}. \quad (10)$$

Накопленная деформация, характеризующая качество перемешивания, равна

$$\Gamma = \gamma_{ave} t_{ave}. \quad (11)$$

Средний размер r включений дисперсной фазы после элемента Мэддока [8] (рис. 3) равен

$$r = \frac{r_0}{\Gamma} q \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad \text{или} \quad \frac{r}{r_0} = \frac{q}{\Gamma} \frac{\mu_1}{\mu_2}, \quad (12)$$

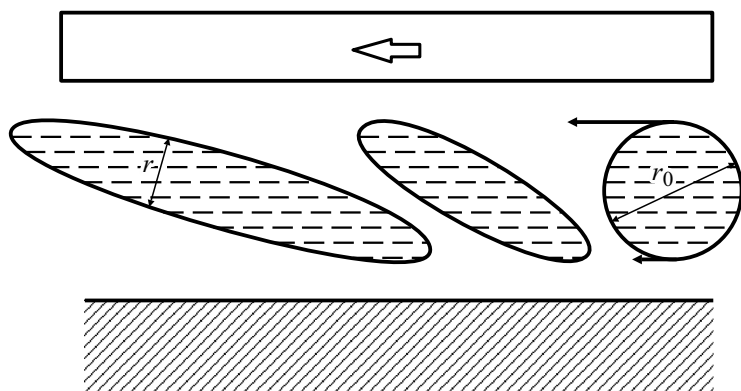


Рис. 3. Уменьшение эффективного размера включений дисперсной фазы при ламинарном течении расплава полимерной композиции в рабочих зазорах перемешивающего элемента.

где μ_1 и μ_2 — вязкость диспергирующей и диспергируемой среды соответственно; q — объемная концентрация диспергируемой фазы; r/r_0 — безразмерный параметр, характеризующий кратность уменьшения размера включений диспергируемой фазы после элемента Мэддока.

Полученные результаты изотермического моделирования течения неньютоновской жидкости использовали для оценки перегрева расплава в рабочих зазорах элемента Мэддока.

Мощность, рассеиваемая в зазорах, равна

$$Q_{\text{diss}} = BLz_k \int_{y=0}^{y=h} (\tau_{xyn}(y)\gamma_{xyn}(y) + \tau_{xyz}(y)\gamma_{xyz}(y)) dy. \quad (13)$$

Перегрев расплава после прохождения смесительного элемента выразим как

$$\Delta T_{\text{diss}} = \frac{Q_{\text{diss}}}{GC_p}, \quad (14)$$

где C_p — удельная теплоемкость композиции.

2. Результаты моделирования течения композиции расплава в рабочих зазорах элемента Мэддока

Для промышленного производства защитных трубок с внутренним антифрикционным слоем для оптических кабелей выбрали следующую композицию: 95% Basell Lupolen® 5231 ПЭВП (полиэтилен высокой плотности) + 2,5% КР-SKTV марки В (высокомолекулярный силиконовый каучук с молекулярной массой 570—700 тыс. единиц) [14] (государственное предприятие Запорожский КРЕМНИПОЛИМЕР) + 2,5% ЦКТН (низкомолекулярный силиконовый каучук) марки Б [14]. Размер агломератов КР-SKTV на входе $r_0 = 5$ —10 мм. Эту композицию получили на линии гранулирования методом одношнековой экструзии [15]. Качество композиции

было недостаточным для промышленного использования, поэтому выполнили повторные операции грануляция и лабораторные исследования коэффициента трения для системы ПЭВП. Образцы, полученные трехкратной обработкой в одношнековом экструдере без перемешивающего элемента Мэддока, были удовлетворительными, поэтому выбрали промышленную схему с двукратным гранулированием в одношнековых экструдерах. Первый экструдер не имел перемешивающего элемента, а второй имел элемент Мэддока, что позволило получить на выходе композицию с агломератами КР-SKTV среднего размера $r = 0,05$ мм.

После многократных измерений в широком диапазоне изменения скорости сдвига с использованием соотношения Оствальда—де Ваэля

$$\tau_{xy} = K |\dot{\gamma}_{xy}|^{n-1} \dot{\gamma}_{xy}$$

установили, что коэффициент консистенции расплава композиции $K = 2,92 \cdot 10^3$ и $n = 0,8567$. Реологические параметры K и n исследовали на капиллярном вискозиметре с диаметром сопла 0,0012 м и длиной 0,008 м при температуре 180 °С в диапазоне $\dot{\gamma} = 1—5$ с⁻¹. Обработку результатов измерений провели по уточненной методике [16].

На основе соотношений (1)—(11) разработали алгоритм и программу расчета в программном обеспечении МАТНСАD. Численные эксперименты выполнили при разной глубине зазора ($h = 0,5—2$ мм с шагом 0,5 мм) и разной длине элементов ($L = 50—200$ мм с шагом 50 мм). Результаты экспериментов представлены на рис. 4.

Максимальное гидравлическое сопротивление элемента Мэддока при обработке композиции 3 МПа, а перегрев расплава не превышал 5 °С. Накопленная деформация Γ в численных экспериментах проиллюстрирована на рис. 5.

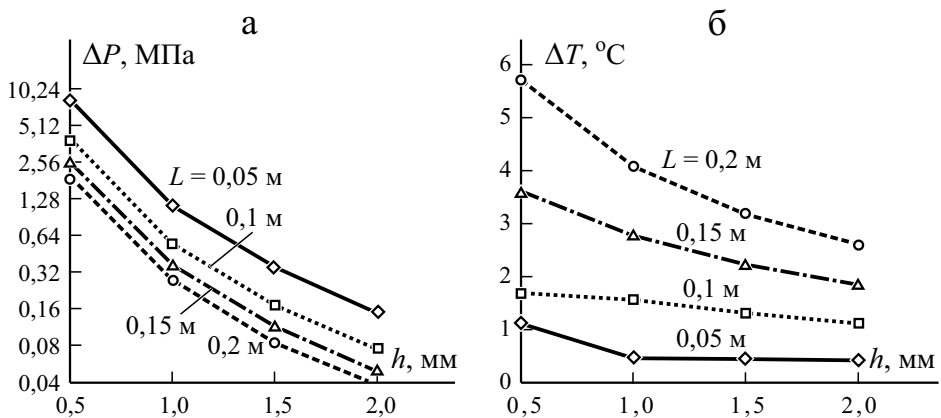


Рис. 4. Зависимость гидравлического сопротивления ΔP элемента Мэддока (а) и перегрев ΔT композиции расплава (б) от высоты рабочего зазора h и длины L элемента Мэддока.

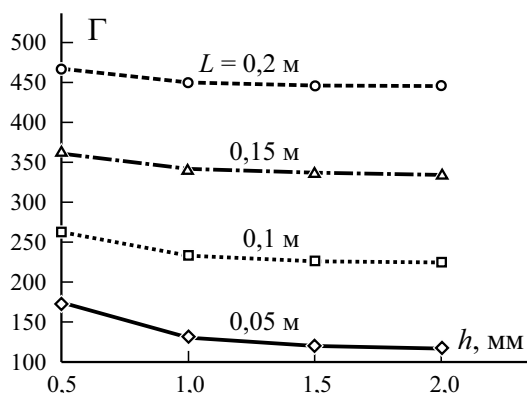


Рис. 5. Расчетная зависимость накопленной деформация Γ (качество смешивания) от высоты h рабочего зазора и длины L элемента Мэддока.

3. Экспериментальная проверка математической модели течения композиции расплава в рабочих зазорах элемента Мэддока

Для натурального эксперимента выбрали экструдер с диаметром цилиндра $D = 63$ мм и длиной шнека $33D$. В зоне загрузки шнек имеет глубину 8 мм (объем поворотной полости $V_1 = 85 \text{ см}^3$) и длину $15D$. На цилиндре также находилась гофрированная гильза зоны загрузки длиной $7D$ (440 мм). Длина зоны сжатия и плавления $12D$, объем полости змеевика $V_2 = 47 \text{ см}^3$ (рис. 6). Степень сжатия в зоне расплава $k = \frac{V_1}{V_2} = \frac{85}{47} = 1,8$.

Зона дозирования содержала элемент Мэддока длиной = 100 мм с шестью входными и шестью выходными каналами ($z_{\text{in}} = z_{\text{out}} = 6$). Диаметр элемента $D_e = 61$ мм ($h = 1$ мм), средняя ширина выступов $B = 5$ мм.

Композиция получена после предварительной обработки на грануляторе без перемешивающего элемента, размер гранул $r_0 = 1$.

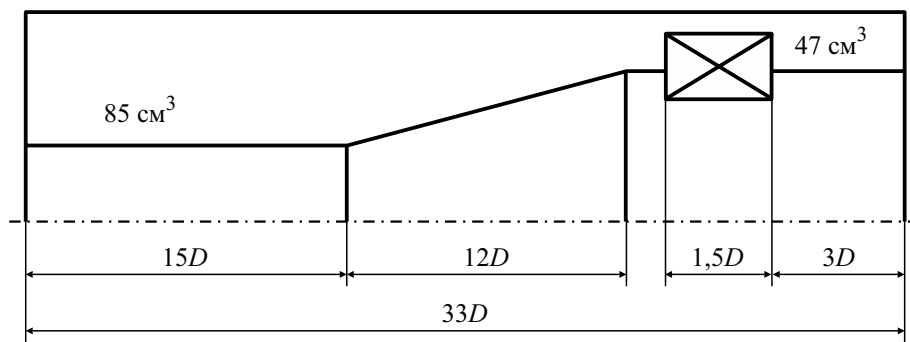


Рис. 6. Конструкция шнека экспериментальной установки с перемешивающим элементом Мэддока.

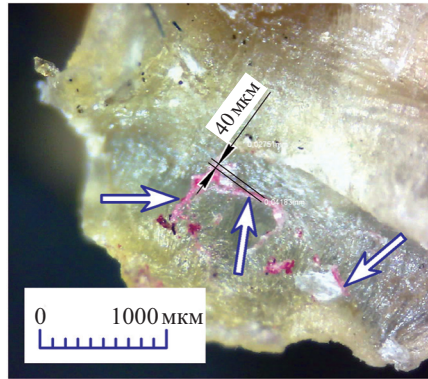


Рис. 7. Микрофотография гранулированной композиции полиэтилена с силиконовым каучуком.

Производительность экструдера (как функция скорости вращения шнека) оставалась линейной вплоть до $f = 80$ об/мин и равной $G = 85$ кг/ч. Температура плавления 180 °С. Микрофотография полученной композиции представлена на рис. 7. Экспериментально установлено, что при однократном экструдировании композиции $r_0 = 1$ мм, $r = 4 \cdot 10^{-5}$ м.

Рассеивание мощности в рабочих зазорах перемешивающего элемента $Q_{\text{diss}} = 101$ Вт, расчетный перегрев расплава в зазорах $\Delta T_{\text{diss}} = 1,58$ °С, $\Delta P = 0,5454$ МПа.

Промежуточные результаты численного эксперимента в натуральных условиях представлены на рис. 8.

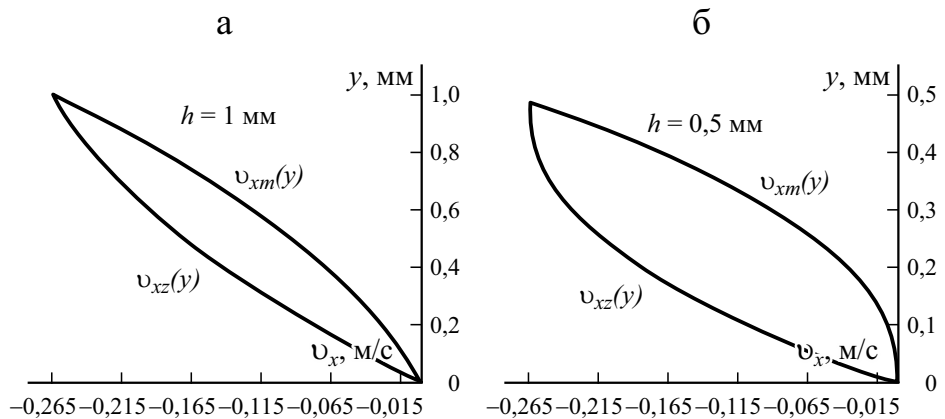


Рис. 8. Скорость потока расплава композиции по высоте канала в набегающем и пригоночном зазорах перемешивающего элемента при разной высоте h рабочего зазора элемента Мэддока.

4. Анализ результатов исследования

1. Предложенная математическая модель процесса гомогенизации композиции полиэтилена с силиконовым каучуком в одношнековом экструдере с элементом Мэддока позволила вычислить конечное значение r и температуру плавления.

2. Для увеличения накопленной деформации в объеме обрабатываемой композиции наиболее эффективным способом является увеличение длины каналов элемента Мэддока и придание ему спиральной структуры.

3. При расчете элемента Мэддока для обработки композиций с низким коэффициентом трения характеристики давления экструдера следует проверить экспериментально.

4. Для промышленного производства антифрикционных композиций методом одношнековой экструзии целесообразно использование каскадной схемы с охлаждением композиции между экструдерами для предотвращения ее перегрева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DSTU EN 61386-24:2015 “Conduit systems for electrical installations.” Part 24, Additional conditions for underground conduit systems (EN 61386-24:2010, IDT). [На укр. яз.]

2. HBN V.2.2-34620942-002:2015 Linijno-kabelni sporudy telekomunikacij. Proektuvannja <http://interiorfor.com/galuzevi-budivelni-normy/gbn-v-2-2-34620942-002-2015/> (дата обращения: 11.08.2020)

3. Cable Jet Jetting Lube (CJL). <https://cablelaying.com.au/wp-content/uploads/2017/02/MSDS-Plumett-Cablejetting-Lube.pdf> (дата обращения: 10.11.2018)

4. Cable Blowing Lubricants for Air-Assisted Installation of Fiber Cable. URL: <https://www.polywater.com/wp-content/uploads/pdf/prelube.pdf> (дата обращения: 11.08.2020)

5. Additive low slip. <http://www.deeplast.com/products/slip-master-batch.pdf> (дата обращения: 11.08.2020)

6. Silicone-based additives that optimize injection molding, extrusion and film production. <https://www.dupont.com/products/PROCESSINGENHANCEMENTWITH-SiADDITIVES.html> (дата обращения: 11.08.2020)

7. STS Mc twin extruder screw designed for masterbatch production. www.coperion.com/en/news-media/newsroom/2016/sts-twin-screw-extruder-for-masterbatch/ (дата обращения: 11.08.2020)

8. Ким В. С., Скачков В. В. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс. — М.: Химия, 1988. — 240 с.

9. Раувендаль К. Экструзия полимеров. — 4-е изд. / Под ред. А. Малкина. — СПб.: Профессия, 2008. — 768 с.

10. Marschik Ch., Osswald T. A., Wolfgang R., Albrecht H., Scrabala O., and Miethlinger Jü. Numerical analysis of mixing in block-head mixing screws // *Polymer Eng. Sci.* — 2019. — Vol. 59, No. 2. — P. E88—E104. doi: 10.1002/pen.24968

11. Park S.-Y. and Luy M.-Y. Simulation of non-isothermal non-Newtonian flow behavior of PP for various injection molding screws and comparison with experimental results // *Macromolecular Res.* — 2018. — Vol. 26, No. 8. — P. 744—754.

12. *Wilczyński K. J., Lewandowski A., Nastaj A., Wilczyński K.* A global model for starve-fed nonconventional single-screw extrusion of thermoplastics // *Adv. Polym. Technol.* — 2017. — No. 36. — P. 23—35.

13. *Dvoinos Ya. H., Nazarchuk V. V., and Khotinetsky M. I.* Calculation of non-Newtonian fluid flow in a channel of annular-cross section // *Visnyk NTUU “KPI” Chem. Eng., Ecology, and Resource Conservation.* — 2015. — Vol. 14, No. 1. — P. 47—51.

14. Silicone Caoutchoucs. URL: <http://silic.com.ua/index.php?Lev=silicone-rubbers> (дата обращения: 11.08.2020)

15. *Radchenko L. B. and Sivetsky V. I.* Fundamentals of Modelling and Construction of Extruder Screws. Manual. — Kyiv: Publ. House Polytechnica, 2002 [на укр. яз.].

16. *Dvoinos Ya. H., Sokolsky A. L., and Ivitsky I. I.* Refined methodology for processing experimental data of capillary viscosimetry // *Visnyk NTUU “KPI” Chem. Eng., Ecology and Resource Conservation.* — 2015. — Vol. 14, No. 1. — P. 51—54.

Поступила в редакцию 22.01.2020

Окончательный вариант поступил 21.01.2021

Received Jan. 22, 2020 (Jan. 21, 2021)
