

Т. А. Анасова, А. А. Панов, Р. Я. Дебердеев,
Г. Е. Заиков, А. К. Панов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОЭКСТРУЗИИ В ЭКСТРУЗИОННОЙ ГОЛОВКЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ДВУХСЛОЙНЫХ ТРУБ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Ключевые слова: расплав, полимер, соэкструзия, двухслойные трубы, ультразвуковые колебания.

Рассматриваются результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований процесса соэкструзии в экструзионной головке для изготовления полимерных двухслойных труб с применением ультразвуковых колебаний. Представлена математическая модель для расчета расходных характеристик с учетом геометрии формирующего канала и параметров ультразвуковых колебаний. Приведена разработанная конструкция экструзионной головки для изготовления полимерных двухслойных труб с применением ультразвуковых колебаний.

Keywords: melt; polymer; co-extrusion; two-layer pipes; ultrasonic vibrations.

The results of theoretical and experimental research of co-extrusion process in extrusion head for two-layer polymeric pipes manufacturing with the use of ultrasonic vibrations are being considered. A mathematic model for calculation of flow rate characteristics according to molding channel geometry and ultrasonic vibrations parameters is being presented. A developed extrusion head structure for manufacturing of two-layer polymeric pipes with the use of ultrasonic vibrations is being presented.

Разработка теоретических зависимостей расходных характеристик расплавов полимеров при соэкструзии двухслойных труб в условиях воздействия ультразвуковых колебаний

Расплавы полимеров в условиях переработки ведут себя как вязкоупругие среды и степень проявления вязкоупругих свойств зависит, в первую очередь, от геометрических параметров канала. Формирующие каналы определяют зависимость эффективной вязкости от частоты ультразвуковых колебаний для расплавов полимеров, которая выражается следующим соотношением [1]:

$$\eta_{\omega} = \frac{\eta}{1 + \omega^2 r^2} \quad (1)$$

где η_{ω} – эффективная вязкость расплава Па с; ω – частота ультразвуковых колебаний, Гц; r – время релаксации, характеризующие скорость спадания напряжения, с

$$r = \frac{\eta}{E} \quad (2)$$

где E – модуль упругости среды, Па.

По мере распространения ультразвуковых волн в среде происходит диссипация энергии, уменьшается амплитуда волны. Это явление характеризуется коэффициентом поглощения [2-8]:

$$\alpha = \omega \left(\frac{\rho}{E} \right)^{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{(1 + \omega^2 r^2)^{\frac{1}{2}} - 1}{2(1 + \omega^2 r^2)}} \quad (3)$$

для случая, когда вязкие силы преобладают, $\omega t \geq 1$, т.е. в случае установившегося изотермического течения имеем

$$\alpha = \left(\frac{\omega \rho}{2\eta} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Величина коэффициента поглощения определяет глубину проникновения ультразвуковых волн в расплав полимера

$$\delta = \frac{1}{\alpha} \quad (5)$$

Как отмечалось ранее в работах авторов [2-5], глубина проникновения ультразвука существенно меньше поперечных размеров канала.

Следовательно, будем рассматривать воздействие ультразвуковых колебаний только на некоторую часть полимерной массы, которая находится в близости от стенки канала (см. рис.1) При этом, зона без воздействия ультразвука R_2-R_3 , зона подверженная воздействию ультразвука R_1-R_2 .

Согласно предлагаемой модели течения, расход расплава полимера при течении в каналах сложного профиля определяется суммой двух расходов: расхода Q_1 в канале сечения $(R_1 - \delta)$, где не наблюдается влияние ультразвуковых колебаний и расхода Q_2 в канале сложного сечения толщиной δ , которое повторяет форму канала и испытывает воздействие ультразвука. В первом случае масса полимера характеризуется эффективной вязкостью $\eta_{\text{эф}}$, во втором – пониженной вязкостью η_{ω} .

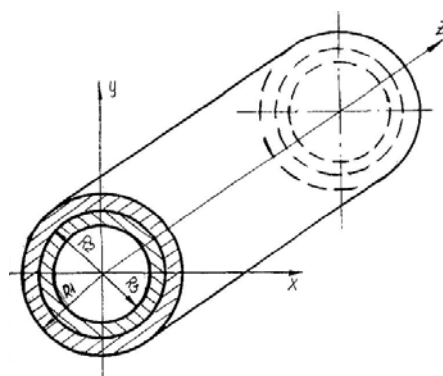


Рис. 1 - Схема двухслойного течения расплавов полимеров в коаксиальной формирующей втулке

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$Q_1 = -\frac{a\rho S}{\tau_0^b} \int_0^{\tau_1} \frac{\tau^b (R_1 - \delta)}{\eta_{эф}} d\tau \quad Q_2 = -\frac{aS}{\tau_0^b} \int_{\tau_1}^{\tau_0} \frac{\tau^b \delta}{\eta_{эф}} d\tau \quad (6)$$

$$Q = -\frac{a\rho S}{\tau_0^b} \left\{ \int_0^{\tau_1} \frac{\tau^b (R_1 - \delta)}{\eta_{эф}} d\tau + \int_{\tau_1}^{\tau_0} \frac{\tau^b \delta}{\eta_{эф}} d\tau \right\} \quad (7)$$

где a и b – коэффициенты формы сечения каналов.

В качестве исходного реологического уравнения состояния приняты выражения:

для внутреннего слоя:

$$\varphi_1 = \varphi_0 + \alpha_1 \tau^2 \quad (8)$$

для внешнего слоя:

$$\varphi_2 = \varphi'_0 + \alpha'_1 \tau^2$$

где φ_0, φ'_0 – наименьшая текучесть расплава полимера внутреннего и внешнего слоев; α_1, α'_1 – постоянный коэффициент, определяемый из экспериментальных данных.

Учитывая, что $\tau = \Delta P \frac{R_r}{2}$, реологические уравнения состояния примут вид:

$$\varphi_1 = \varphi_0 + \alpha_1 \left(\frac{\Delta P}{2} \right)^2 R_r^2 \quad \varphi_2 = \varphi'_0 + \alpha'_1 \left(\frac{\Delta P}{2} \right)^2 R_r^2 \quad (9)$$

Подставляя зависимости (9) и (1) в уравнение (7) будем иметь (10):

$$Q = \frac{\alpha \rho S R_r^2 \Delta P}{2} \left\{ \frac{\varphi_0}{4} + \frac{\alpha_1 (R_r - \delta)}{6} + \omega^2 r^2 \left[\frac{\delta}{R_r - \delta} (\varphi_0 + \alpha_1 \tau_0^2) + \frac{R_r \delta^2}{(R_r - \delta)^4} \left(\varphi_0 + \frac{3}{2} \alpha_1 \tau_0^2 \right) \right] \right\}$$

Однако, как показывают расчеты и проведенные исследования, эта формула носит общий характер и может быть использована для сложных каналов, при использовании которых ультразвуковые колебания проникают по всей длине периметра канала.

Этот фактор зависит от того, каким образом монтируется магнитострикционный излучатель в формирующем инструменте. Так, например, в разработанной нами конструкции предлагается использовать пакетный излучатель, снаружи канала, поэтому ультразвуковые колебания будут воздействовать лишь на ту часть полимерной массы, которая контактирует со стенкой дорна (рис. 1).

В связи с этим, нами предлагается в уравнение (10) ввести некоторые коэффициенты K_1 и K_2 , уменьшающие или увеличивающие значения Q_1 и Q_2 в зависимости от того, на какую часть периметра канала проникает ультразвук. Получить эти коэффициенты достаточно просто.

$$K_1 = \frac{\Pi_1}{\Pi}$$

где Π – общий периметр канала; Π_1 – периметр на котором наблюдается воздействие ультразвука.

Повышающий коэффициент расхода равен

$$K_2 = 2 - K_1$$

Тогда, с учетом предлагаемых коэффициентов выражение (10) примет вид (11):

$$Q = \frac{\alpha \rho S R_r^2 \Delta P}{2} \left\{ \frac{\varphi_0}{4} + \frac{K_2 \alpha_1 (R_r - \delta)}{6} + \omega^2 r^2 \left[\frac{\delta}{K_2 (R_r - \delta)} (\varphi_0 + \alpha_1 \tau_0^2) + \frac{R_r \delta^2}{(K_2 (R_r - \delta))^4} \left(\varphi_0 + \frac{3}{2} \alpha_1 \tau_0^2 \right) \right] \right\}$$

Для предлагаемых конструкций экструзионной головки понижающие и повышающие коэффициенты равны соответственно:

$$K_1 = 0.75; K_2 = 1.25.$$

Как показывают расчеты по полученным формулам, при выборе формы сечения канала акустических экструзионных головок следует отдавать предпочтение тем, у которых ультразвук оказывает воздействие по всему периметру канала для достижения максимального эффекта воздействия. Предпочтительнее использовать симметричные каналы с плавным срезом углов. Наиболее эффективными в этом плане будут считаться многоручьевые головки. Все выводы были учтены при проектировании конструкции экструзионной головки, работающей в условиях ультразвукового воздействия, конструкция которой приведена в настоящей работе.

Опытно-промышленные испытания экструзионной головки для изготовления полимерных двухслойных труб с применением ультразвуковых колебаний

Для проверки приемлемости предложенных теоретических методов расчета параметров при соэкструзии расплавов полимеров в коаксиальных формирующих втулках (кольцевых каналах) было проведено экспериментальное изучение многослойного течения расплавов полимеров на опытно-промышленной установке (рис. 2). Она состоит из двух экструдеров: для внутреннего и внешнего слоев. Для внешнего слоя использовался экструдер марки АТЛ-45 с червяком диаметром 45 мм и длиной 1125 мм, а для среднего слоя – экструдер ЧП-40 с червяком диаметром 40 мм, и длиной 640 мм

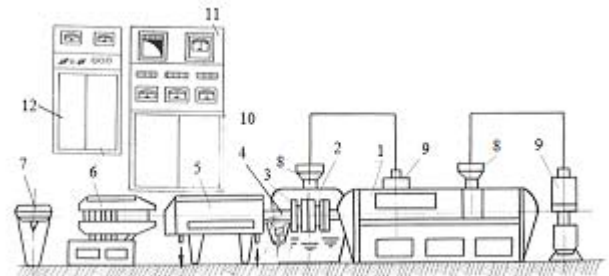


Рис. 2 – Опытно-промышленный экструзионный агрегат для изготовления многослойных полимерных труб с применением ультразвука: 1 – экструдер АТЛ-45-П; 2 – экструдер ЧП-40; 3 – экструзионная головка; 4 – калибрующая насадка; 5 – охлаждающая ванна; 6 – тянущее устройство; 7 – отрезное устройство; 8 – бункер с устройством для подсушки и подогрева гранул; 9 – пневмозагрузчик; 10 – электрощит; 11 – магнитострикционный преобразователь ПСМ6-22; 12 – ультразвуковой генератор УЗГ1-4

В данной работе рассматривается конструкция экструзионной головки для изготовления полимерных двухслойных труб с применением ультразвуковых колебаний. Головка, в соответствии с рисунком 3, содержит разъемный корпус 1, в котором расположен дорнодержатель 2 с цилиндрическим участком. Между ребрами 3 дорнодержателя вы-

полнены отверстия 4 для прохода расплава, в которых расположены регулировочные винты 5. На входном торце дорнодержателя 2 установлен полушаровой элемент 6 с фрезерованными пазами 7, а на выходном конце закреплен дорн 8. На корпусе 1 установлена формирующая втулка 9. Дорн смонтирован с возможностью его центрирования посредством винтов 10 и в нем выполнен канал 11 для охлаждающей среды, связанный с патрубком 12. Между дорном и втулкой образована формирующая щель 13.

В корпусе 1 также смонтирован дорн 14 с образованием проточного канала 15 для подачи внешнего слоя расплава и канала 16 для подачи внутреннего слоя расплава. Каналы 15 и 16 расположены наклонно друг относительно друга и сообщены формирующей щелью 13.

На наклонной поверхности формирующей втулки 9 смонтированы два магнитострикционных излучателя 17 марки ПМС6-2 с возможностью подключения к источнику 18 ультразвуковых колебаний УЗГ1-4.

В магнитострикционные излучатели подается сжатый воздух для их охлаждения. Установка магнитострикционных излучателей в зоне

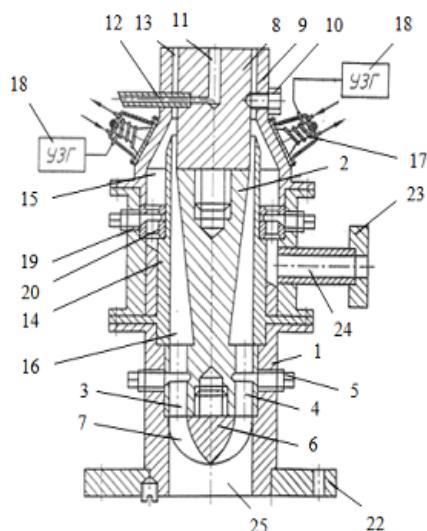


Рис. 3 - Экструзионная головка для изготовления полимерных двухслойных труб с применением ультразвуковых колебаний

соединения внешнего и внутреннего слоев расплава, позволяет одновременно воздействовать на оба слоя, что увеличивает пропускную способность формирующего канала и улучшает качество изготавливаемых труб.

В формирующей щели расплав претерпевает уменьшение проявления высокоэластичности экструдата, и как следствие этого уменьшается постэкструзионное разбухание экструдированного изделия [10]. В канале 15 установлена решетка 19 с отверстиями 20, в которых смонтированы регулировочные винты 21. Регулировочные винты 5 и 21 выполнены с цилиндрическим рабочим участком. Корпус 1 головки соединен с экструдерами (не показаны) посредством фланцев 22 и 23. Для подачи расплавов от экструдеров предназначены каналы 24 и 25.

Экспериментальные исследования проводились на опытной установке с экструдером АТЛ-45, имеющим червяк диаметром 45 мм и длиной 1125 мм для продавливания внутреннего слоя расплава полимера и экструдера марки 4П-40 с червяком диаметром 40 мм и длиной 640 мм, для подачи внешнего слоя расплава полимера.

Получали двухслойную полимерную трубу с наружным диаметром 25 мм, и внутренним диаметром 21 мм. Для внутреннего слоя трубы использовался полиэтилен низкого давления марки 277-73, для внешнего слоя трубы применялся полиэтилен высокого давления марки 15802-020.

Оптимальный режим экструзии указанных полимеров при температуре 423 К и создаваемом давлении экструдерами в пределах 3,5-4,5 МПа, при фиксированной частоте наложения ультразвуковых колебаний 18,5; 21,6; 22,1 и 23,5 кГц на расплав слоев расплавов, создаваемые ультразвуковым генератором марки УЗГ1-4.

На рис.4 представлены теоретические значения расхода расплавов полимеров при изготовлении двухслойных труб с учетом ультразвуковых колебаний в сопоставлении с опытными данными. Расхождение при этом составляло не больше 7%.

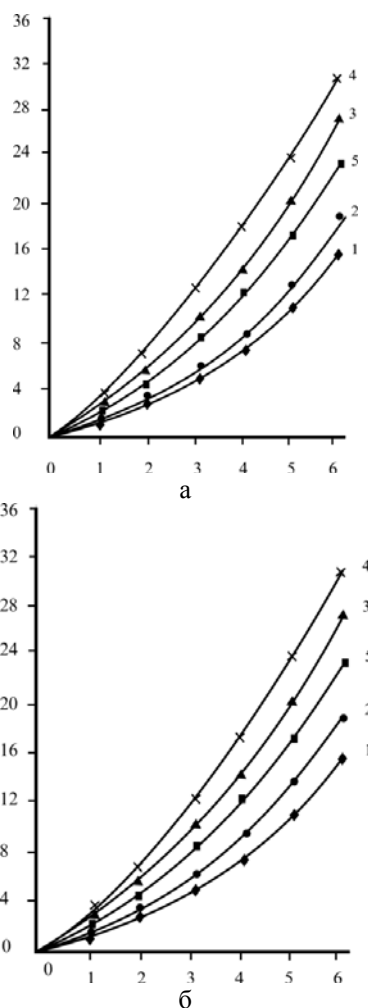


Рис. 4 - Зависимость расхода ПНД и ПВД от градиента давления при двухслойной соэкструзии трубы, при температуре 423 К (а) и 443 К (б): - без УЗК; ● - 18,5 кГц; ▲ - 21,6 кГц; X - 22,1 кГц; ■ - 23,5 кГц

Таким образом предложенную теорию можно рекомендовать для расчетов экструзионных головок при изготовлении полимерных многослойных труб.

Технический результат, обеспечиваемый экструзионной головкой для изготовления полимерных двухслойных труб с применением ультразвуковых колебаний, выражается в упрощении конструкции и повышении производительности и качества получаемых изделий, благодаря выбору оптимальной геометрии поперечного сечения формирующих каналов.

Литература

1. Михайлов М.Г., Соловьев В.А., Сырников Ю.И. Молекулярная акустика. М.: Наука, 1964. 514с.
2. Панов А.А. Многооручьевые экструзионные головки и методы интенсификации процессов экструзии. Уфа: Гилем, 2008. 192 с.
3. Володин В.П. Экструзия профильных изделий из термопластов. СПб.: Профессия, 2005. 480 с.
4. Панов А.К., Дорохов И.Н., академик Кафаров В.В. Закономерности процесса течения расплавов полимеров в условиях ультразвуковых колебаний // М.: Доклады Академии наук СССР, 1988. Т.303. №1. С.155-158.
5. Панов А.К. Влияние наложения ультразвука на процесс течения расплавов полимеров// Реология, процессы и аппараты химической технологии. Волгоград: Изд-во ВПИ, 1983. С.100-103.
6. Kiselyova O.F., Panov A.A., Minsker K.S., Panov A.K. and Zaikov G.E. Design and method of calculation of acoustic extruder head for manufacturing of long polymeric profile products// Leading edge research on polymers and composites, New York: Nova Science Publishers, 2004. P.71-76.
7. Абрамов О.В., Градов О.М. Стационарное акустическое течение вязкой жидкости под воздействием мощного ультразвука// Материаловедение 2007, №11. С.2-8.
8. Абрамов В.О., Булычев Н.А., Градов О.М., Кистерев Э.В., Муллакаев М.С. Исследование особенностей ультразвукового воздействия на гетерогенные системы жидкость–дисперсные включения газовой, жидкой и твердой фазы// Современные проблемы общей и неорганической химии. М.: 2009. С.479-483.
9. Патент РФ №2433913 Экструзионная головка для изготовления полимерных двухслойных труб с применением ультразвуковых колебаний/ Панов А.А., Анасова Т.А., Жернаков В.С., Панов А.К.// 2011. Бюл.№32.
10. Панов А.А., Анасова Т.А., Заиков Г.У., Панов А.К. Влияние ультразвука на характеристики расплавов полимеров при экструзии// Теоретические основы общей химической технологии. 2011. Том 45. №4. С.461-467.

© **Т. А. Анасова** – канд. техн. наук, доц. каф. математики БГАУ; **А. А. Панов** – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. Стерлитамакского филиала АН РБ; **Р. Я. Дебердеев** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологии переработки полимеров и композиционных материалов КНИТУ, deberdeev@kstu.ru; **Г. Е. Заиков** – д-р хим. наук, проф., Институт биохимической физики им. Н.М.Эмануэля РАН; **А. К. Панов** – д-р техн. наук, проф., член-корр. АН РБ, зав. отделом ГАНУ ИПИ.