

Т. В. Шулаева (к.т.н., доц.), С. В. Лапонов (к.т.н., доц.),
Н. С. Шулаев (д.т.н., проф.), С. П. Иванов (д.т.н., доц., зав.каф.)

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ЭКСТРУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Уфимский государственный нефтяной технический университет, филиал в г.Стерлитамаке,
кафедра «Оборудование нефтехимических заводов»
453110, г. Стерлитамак, пр. Октября, 2; e-mail.: isp-777@yandex.ru

T. V. Shulaeva, S. V. Laponov, N. S. Shulaev, S. P. Ivanov

INTENSIFICATION OF EXTRUSION PROCESSES BY ULTRASONIC VIBRATIONS

Ufa State Petroleum Technological University, Branch in the Sterlitamak
2, Prospekt Oktyabrya Str., 453118, Sterlitamak, Russia; e-mail: isp-777@yandex.ru

Рассматриваются закономерности течения anomalously вязких жидкостей, на примере расплавов полимеров, под воздействием ультразвукового излучения. С учетом глубины поглощения излучения определена производительность цилиндрического канала экструзионной установки. Показано, что реализуется «вухслойная» модель течения. Область расплава полимера, на который воздействует ультразвуковое излучение, характеризуется пониженной вязкостью, позволяющей уменьшить силы сопротивления. Предлагаемый способ воздействия ультразвукового излучения на расплав полимера повышает производительность технологического оборудования и улучшает качество товарных изделий.

Ключевые слова: расплав полимера; тензор; течение полимера; ультразвуковое излучение; упруго-вязкие жидкости; цилиндрический канал; экструзия; экструдат.

The regularities of the flow of anomalously viscous liquids are considered, using the example of polymer melts, under the influence of ultrasonic radiation. Taking into account the depth of radiation absorption, the productivity of the cylindrical channel of the extrusion unit was determined. It is shown that a "two-layer" flow model is implemented. The area of the polymer melt, which is affected by ultrasonic radiation, is characterized by a reduced viscosity, which allows to reduce the resistance forces. The proposed method of exposure to ultrasonic radiation on the polymer melt increases the productivity of technological equipment and improves the quality of commercial products.

Key words: cylindrical channel; elastic-viscous liquids; extrudate; extrusion; polymer flow; polymer melt; tensor; ultrasonic radiation.

Использование излучений различной природы (СВЧ, ультразвуковое и др.) в производстве и переработке полимеров является актуальной задачей, так как ее решение способствует уменьшению энергозатрат, увеличению производительности технологического оборудования и повышению качества товарной продукции¹⁻⁵. В частности, воздействие ультразвукового излучения на расплав полимера приводит к снижению динамической вязкости, что позволяет повысить эффективность функционирования формирующего оборудования. Для внедрения предлагаемого метода интенсификации технологического процесса формования, основанного на воздействии ультразвукового излучения на расплав полимера, необходи-

ма разработка методов расчета производительности оборудования с учетом влияния ультразвуковых колебаний на динамику процесса. В представленной работе приводится метод расчета расходных характеристик в процессе экструзии расплавов полимеров при воздействии на расплав ультразвуковых колебаний. Рассматривается течение anomalously-вязкой жидкости в цилиндрическом канале, ось z цилиндрической системы координат совпадает с осью симметрии канала. Вводятся следующие допущения:

1. Скорости поперечных потоков расплава полимера в канале пренебрежимо малы по сравнению с продольными.

2. Жидкость несжимаема и описывается реологическим законом

Дата поступления 18.05.23

$$\frac{1}{\mu} = \varphi = f(\tau^2),$$

где μ – динамическая вязкость;
 φ – текучесть полимера;
 $\tau = \tau_{rz}$ – напряжение сдвига.

3. Скольжение по стенке канала отсутствует, т.е. $V_z(r=R) = 0$, при этом напряжение сдвига принимает максимальное значение $\tau_{rz}(r=R) = \tau_0$;

4. Процесс течения развитый, установившийся, ламинарный, изотермический.

С учетом принятых допущений уравнение движения неньютоновской жидкости в цилиндрическом канале имеет вид ⁶:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} = \frac{\Delta P}{L}, \quad (1)$$

где $\Delta P = P_1 - P_2$;
 $P_{1,2}$ – давления на входе и выходе канала;
 L – длина канала;
 r – радиальная координата $0 < r \leq R$;
 R – радиус канала.

Введем обозначение $\Delta P_L = \Delta P/L$ – перепад давления на единицу длины канала, индексы у компонентов тензора напряжений $\tau_{rz} = \tau$ будем опускать. Из решения уравнения (1) следует:

$$\tau = \Delta P_L \frac{r}{2} \quad (2)$$

при $0 < r \leq R$.

Для упруго-вязких жидкостей, какими являются расплавы полимеров, зависимость эффективной вязкости от частоты ультразвуковых колебаний определяется соотношением ⁶:

$$\eta(\omega) = \frac{\eta}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (3)$$

где η – эффективная вязкость;
 ω – круговая частота колебаний;
 $\tau = \eta/E$ – время запаздывания;
 E – модуль упругости расплава полимера.

При распространении ультразвукового излучения в расплаве полимера из-за диссипативных процессов происходит уменьшение амплитуды волны, при этом коэффициент поглощения определяется параметрами среды и частотой колебаний

$$\alpha(r) = A_0 e^{-\alpha r} \quad (4)$$

$$\alpha = \omega \left(\frac{\rho}{E} \right)^{\frac{1}{2}} \left[\frac{(1 + \omega^2 \tau^2)^{\frac{1}{2}} - 1}{2(1 + \omega^2 \tau^2)} \right]^{\frac{1}{2}},$$

где ρ – плотность полимера.

В случае относительно высоких значений сил вязкого трения, когда $\omega\tau \gg 1$, последнее соотношение принимает вид:

$$\alpha = \left(\frac{\omega\rho}{2\eta} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Характерная глубина проникновений ультразвуковых волн в расплав полимера определяется как $\delta \equiv \frac{1}{\alpha}$ и в области частот $\omega \equiv 4\pi \cdot 10^4$ рад/с ($\nu = 20$ кГц) для типичных параметров расплавов промышленных полимеров ($\mu \approx 10^2$ Па·с, $\rho \approx 700$ – 800 кг/м³) составляет $\delta \sim 10^{-3} \dots 10^{-4}$ м, что значительно меньше поперечных размеров формирующих каналов. Следовательно, не вся масса, а только ее часть, непосредственно прилегающая к стенке, подвергается ультразвуковому воздействию. Следовательно, для расчета расходных характеристик формирующих каналов будем представлять поток расплава состоящий из двух зон. Внешняя часть потока толщиной δ имеет пониженную, из-за ультразвукового излучения, вязкость $\eta(\omega)$, внутреннее ядро потока радиуса $R_1 = R_0 - \delta$, где R_0 – радиус канала имеет вязкость независимую от частоты, так как ультразвуковые излучения в эту область расплава не проникают (рис. 1).

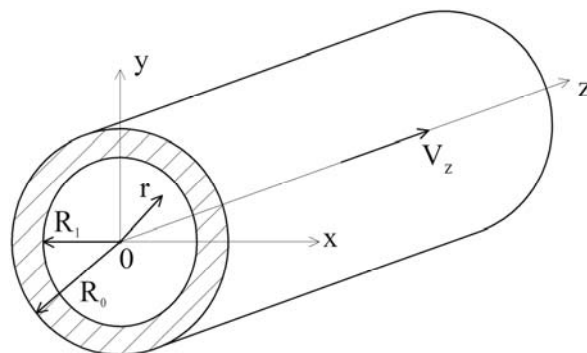


Рис. 1. Схема течения расплава полимера в цилиндрическом канале при воздействии УЗ-колебаний

В соответствии с предложенной моделью уравнения для определения градиентов продольной скорости потока расплава полимера, принимают вид

$$\begin{cases} \frac{dV_z}{dr} = \varphi_1 \tau & \begin{cases} 0 < r < R_1 \\ R_2 < r \leq R_0 \end{cases} \\ \frac{dV'_z}{dr} = \varphi_2 \tau & \end{cases}, \quad (6)$$

где φ_1 и φ_2 – текучесть расплава полимера во внутренней и внешней областях, определяемые следующими реологическими законами:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_0 + \alpha_1 \tau^2 \\ \varphi_2 = \varphi'_0 + \alpha'_1 \tau^2 \end{cases} \quad (7)$$

где φ_0 и φ'_0 – наименьшая текучесть расплава полимера для внутреннего и внешнего слоев, соответственно; α_1 и α'_1 – коэффициенты учитывающие зависимость текучести от напряжения сдвига определяемые экспериментально.

Реологические уравнения состояния (7) с учетом соотношения (2) принимают вид

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_0 + \alpha_1 \left(\frac{\Delta P_L}{2} \right)^2 r^2 \\ \varphi_2 = \varphi'_0 + \alpha'_1 \left(\frac{\Delta P_L}{2} \right)^2 r^2 \end{cases} \quad (8)$$

Полученная зависимость $\varphi_{1,2}(r)$ позволяет определить скорости движения расплава во внутренней и внешней областях

$$V_z = \frac{\Delta P}{4} \left\{ \varphi_0 (R_1^2 - r^2) + \frac{\alpha_1}{2} \left(\frac{\Delta P}{2} \right)^2 (R_1^4 - r^4) + \right. \\ \left. + (R_0^2 - R_1^2) \varphi'_0 + \frac{\alpha'_1}{2} \left(\frac{\Delta P}{2} \right)^2 (R_0^4 - R_1^4) \right\} \quad (9)$$

$$0 < r \leq R_1$$

$$V'_z = \frac{\Delta P}{4} \left[\varphi'_0 (R_0^2 - r^2) + \frac{\alpha'_1}{2} \left(\frac{\Delta P}{2} \right)^2 (R_0^4 - r^4) \right], \quad (10)$$

$$R < r \leq R_0.$$

Как видно из приведенных соотношений профиль скорости в канале определяется реологическими параметрами и частотой УЗ колебаний и отличается от квадратичной зависимости от радиальной координаты характерной для ньютоновских жидкостей.

Соотношения (9) и (10) позволяют определить расход расплава полимера для двухслойной модели как сумму расходов центральной и периферийной частей потока

$$q = q_1 (r \leq R_1) + q_2 (R_1 < r \leq R_0) = \\ = 2\pi \int_0^{R_1} V_z r dr + 2\pi \int_{R_1}^{R_0} V'_z r dr; \\ q_1 = \frac{\pi R_1^2 \Delta P}{4} \left[\frac{\varphi_0 R_1^2}{2} + \frac{\alpha_1}{3} \left(\frac{\Delta P}{2} \right)^2 R_1^4 + \right. \\ \left. + \varphi'_0 (R_0^2 - R_1^2) + \frac{\alpha'_1}{3} \left(\frac{\Delta P}{2} \right)^2 (R_0^4 - R_1^4) \right]; \quad (11)$$

$$q_2 = \frac{\pi (R_0^2 - R_1^2) \Delta P}{8} \left[(R_0^2 + R_1^2) \varphi'_0 + \frac{\alpha'_1}{3} \left(\frac{\Delta P}{2} \right)^2 (R_0^4 + 2R_1^4) \right]. \quad (12)$$

Как видно из последних соотношений, расход расплава полимера пропорционален площади сечения центральной и периферийной частей потока и зависит от частоты УЗ колебаний. Учитывая, что текучесть расплава полимера в области проникновения УЗ излучения возрастает $\varphi' = \varphi(1 + \omega^2 \tau^2)$, можно определить зависимость расходной характеристики от частоты ω .

$$q = \frac{\pi R_0^2 \Delta P}{4} \left\{ \frac{R_1^2}{R_0^2} \left[\frac{\varphi_0 R_1^2}{2} + \frac{\alpha_1}{3} \left(\frac{\Delta P}{2} \right)^2 R_1^4 + \right. \right. \\ \left. \left. + \varphi_0 (1 + \omega^2 \tau^2) (R_0^2 - R_1^2) + \frac{\alpha'_1}{2} \left(\frac{\Delta P}{2} \right)^2 (R_0^4 - R_1^4) \right] + \right. \\ \left. + \frac{R_0^2 - R_1^2}{2 R_0^2} \left[\varphi_0 (1 + \omega^2 \tau^2) (R_0^2 + R_1^2) + \frac{\alpha'_1}{3} \left(\frac{\Delta P}{2} \right)^2 (R_0^4 + 2R_1^4) \right] \right\} \quad (13)$$

Из приведенного соотношения следует, что воздействие УЗ излучения на полимер приводит, при заданном перепаде давления, к увеличению расхода, а, следовательно, и производительности и зависит от глубины зоны воздействия УЗ колебаний $\delta = R_0 - R_1$. Как следует из экспериментальных данных ² (рис. 2), воздействие ультразвукового излучения приводит к существенному увеличению объемного расхода расплава полимера при заданном значении перепада давлений, что делает энергетически целесообразным предлагаемый способ интенсификации процесса экструзии.

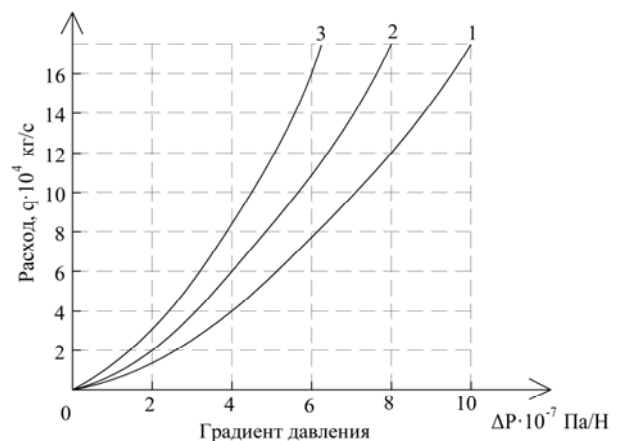


Рис. 2. Зависимость расхода расплава полимера:
1 – без УЗК; 2 – 18.5 кГц; 3 – 21.5 кГц

Таким образом, приведенный метод расчета расходных характеристик процесса экструзии расплавов полимеров, на который воздействует ультразвуковое излучение, может использоваться при проектировании экструзионной аппаратуры конкретных технологических установок.

Литература

1. Мейсон Т. Химия и ультразвук. – М.: Мир, 1993. – 190 с.
2. Бондарь К.Е., Шулаев Н.С., Ибрагимов И.Г., Иванов О.С., Иванов С.П. Контактные устройства из полимерных материалов для тепломассообменных процессов. – Уфа: Издательство УГНТУ, 2016. – 142 с.
3. Shulaev N.S., Suleimanov D.F. Technology of changing the characteristics on insulating materials based on polyvinyl chloride under the influence of microwave radiation // *Science of Europe*. – 2017. – V.2, №13. – Pp. 94-97.
4. Шулаев Н.С., Абакачева Е.М., Сулейманов Д.Ф. Исследование физико-механических свойств полимерных материалов, модифицированных в электромагнитном поле СВЧ диапазона // *Бутлеровские сообщения*. – 2011. – Т.24, №1. – С.95-98.
5. Кирш И.А., Чалых Т.И., Ананьев В.В., Зайков Г.Е. Модификация свойств биodeградируемых полимерных композиций при воздействии ультразвука на их свойства // *Вестник технологического университета*. – 2015. – Т.18, №9. – С.74-77.
6. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Т. VI Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – 736 с.

References

1. Meyson T. *Khimiya i ul'trazvuk* [Chemistry and ultrasound]. Moscow, Mir Publ., 1993, 190 p.
2. Bondar K.E., Shulaev N.S., Ibragimov I.G., Ivanov O.S., Ivanov S.P. *Kontaktnyye ustroystva iz polimernykh materialov dlya teplomassoobmennyykh protsessov* [Contact devices made of polymeric materials for heat and mass transfer processes]. Ufa, USPTU Publ., 2016, 142 p.
3. Shulaev N.S., Suleimanov D.F. [Technology of changing the characteristics on insulating materials based on polyvinyl chloride under the influence of microwave radiation]. *Science of Europe*, 2017, vol.2, no.13, pp.94-97.
4. Shulayev N.S., Abakacheva E.M., Suleymanov D.F. *Issledovaniye fiziko-mekhanicheskikh svoystv polimernykh materialov, modifitsirovannykh v elektromagnitnom pole SVCH diapazona* [Study of the physical and mechanical properties of polymeric materials modified in the electromagnetic field of the microwave range]. *Butlerovskkiye soobshcheniya* [Butlerov Communications], 2011, vol.24, no.1, pp.95-98.
5. Kirsh I.A., Chalykh T.I., Ananiev V.V., Zaykov G.E. *Modifikatsiya svoystv biodegradiruyemykh polimernykh kompozitsiy pri vozdeystvii ul'trazvuka na ikh svoystva* [Modification of the properties of biodegradable polymer compositions when exposed to ultrasound on their properties]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2015, vol.18, no.9, pp.74-77.
6. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika: T. VI Gidrodinamika* [Theoretical Physics. V. VI Hydrodynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 736 p.