

УДК 541

А. А. ПАНОВ, В. С. ЖЕРНАКОВ

ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ВЫСОКОЭЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЭКСТРУДАТОВ ПРИ ЭКСТРУЗИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

Целью данной работы является теоретическое и практическое исследование по оценке высокоэластических свойств экструдатов при экструзии под воздействием ультразвука. Эффект постэкструзионного разбухания расплавов полимеров привлекает внимание многочисленных исследователей из-за явной связи этого явления с высокоэластичностью – фундаментальным свойством этих систем, практической важностью учета изменения размеров экструдата при выборе требуемых размеров формующих каналов для изготовления изделий заданной формы сечения. *Расплав полимера; экструдат; коэффициент разбухания; высокоэластические свойства, вязкость*

Для исследования были выбраны образцы экструдатов, полученные для исследуемых полимерных материалов при использовании профильных каналов различных длин в интервале температур 423–503 К, при различных частотах ультразвука.

Явление высокоэластического восстановления экструдатов через формующий инструмент расплавов хорошо известно в практике переработки пластических масс. Описанию этого явления посвящен целый ряд работ [1–2, 4], в которых разработаны модели различной степени сложности, позволяющие количественно оценивать это явление. Однако следует отметить, что наиболее простые модели дают приблизительную оценку и недостаточно адекватно соответствуют экспериментальным данным. Более сложные модели достаточно громоздки в практическом применении, так как содержат большое количество параметров. Наряду с этим ни одна из моделей не рассматривает «разбухание» полимерных изделий сложного профиля, полученных в условиях воздействия ультразвуковых колебаний. Описание явления «разбухания» ограничивается, как правило, экструдатами в виде прутка круглого поперечного сечения или плоского листа.

1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА РАЗБУХАНИЯ ЭКСТРУДАТА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКА

В связи с этим практический интерес представляет математическая зависимость, позволяющая количественно определить эффект раз-

бухания при продавливании расплавов полимеров через каналы любого сложного сечения при использовании ультразвуковых вибраций.

Как показано в ряде работ, на величину разбухания экструдатов оказывают влияние молекулярные характеристики, физические свойства материала, технологические условия переработки (температура, скорость, напряжение сдвига), а также геометрические размеры формующего канала.

Моделируя эффект разбухания экструдата, будем считать, что при течении полимера через канал его частицы, подвергаясь сдвиговой деформации, удлиняются, а после выхода из канала сокращаются. Причем это растяжение и сокращение частиц носит упругий характер.

Таким образом, в выражении, описывающем математически коэффициент разбухания, обязательно наличие длины канала L и его площади S_k . Помимо этих величин обязательно учитывается давление экструзии P , эффективная вязкость $\eta_{\text{эф}}$, градиент скорости сдвига $\dot{\gamma}$ и параметр, учитывающий высокоэластические свойства среды Θ .

Зависимость эффективной вязкости от частоты ультразвуковых колебаний для расплавов полимеров выражается следующим соотношением [3]:

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

где η – вязкость расплава полимера; ω – частота ультразвуковых колебаний; r – время релаксации, характеризующее скорость спада напряжения:

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

где E – модуль упругости среды.

С точки зрения практики интерес представляет степенная зависимость перечисленных переменных [3], записанная в следующем виде:

$$K = A \cdot \bar{\gamma}^{n_1} \cdot \Theta^{n_2} \cdot P^{n_3} \cdot \eta_{эф}^{n_4} \cdot L^{n_5} \cdot S^{n_6}, \quad (3)$$

где A – безразмерный коэффициент, учитывающий природу материала.

При использовании π -теоремы и теории групп в результате была получена зависимость для определения коэффициента разбухания в цилиндрическом канале:

$$K = A \cdot (\bar{\gamma} \cdot \Theta)^{n_1} \cdot \left(\frac{\eta_{эф}}{P\Theta} \right)^{n_2} \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S_K}} \right)^{n_3}. \quad (4)$$

Постоянная A и показатели степеней $n_1 - n_3$ определяются экспериментально.

Чтобы получить необходимую модель расчета искомого коэффициента для каналов сложной формы, необходимо в выражение (4) ввести коэффициенты формы канала a и b :

$$K = A \cdot a^{m_1} \cdot b^{m_2} \cdot (\bar{\gamma} \cdot \Theta)^{n_1} \cdot \left(\frac{\eta_{эф}}{P\Theta} \right)^{n_2} \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{S_K}} \right)^{n_3}. \quad (5)$$

Коэффициенты формы, входящие в выражение (5), определялись экспериментально на приборе мембранной аналогии [4], представлены в табл. 1.

Работами многих авторов [6–8] подтверждено, что при наложении на поток расплава ультразвуковых колебаний наблюдается заметное снижение коэффициента разбухания. Происходит это за счет снижения эффективной вязкости расплава $\eta_{эф}$ до некоторого значения η_{ω} , определяемого из уравнения (1).

Нам представляется целесообразным ввести в уравнение (5) этот параметр, характеризующий влияние ультразвука.

Тогда выражение приобретает следующий вид:

$$K = A a^{m_1} b^{m_2} (\bar{\gamma} \cdot \Theta)^{n_1} \left(\frac{\eta_{\omega}}{P\Theta} \right)^{n_2} \left(\frac{L}{\sqrt{S_K}} \right)^{n_3}. \quad (6)$$




Полученное выражение (6) представляет собой математическую модель, описывающую влияние наложения ультразвуковых колебаний на разбухание экструдата.

Полученная зависимость (6) позволяет определить коэффициент разбухания при истече-

нии расплава из каналов сложной формы в условиях воздействия ультразвука. Полученное уравнение доказывает, что коэффициент разбухания зависит от реологических характеристик полимера, геометрических параметров канала, давления экструзии, частоты ультразвуковых колебаний.

Коэффициенты формы для исследования профильных каналов разработанных экструзионных головок, полученных на приборе мембранной аналогии, представлены в табл. 1, для профильных формующих каналов с поперечными сечениями в виде: плитус, мебельный полозок и строительный штапик.

Таблица 1
Значения геометрических размеров и коэффициентов формы исследуемых каналов

Контур исследуемого канала	$R_{г}$, мм	S , мм ²	Π , мм	L , мм	a	b
	4,28	467,0	109,0	140 160	1,80	2,45
	1,8	156,0	86,0	140 160	1,92	2,42
	1,89	198,0	99,5	140 160	1,76	2,71

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РАЗБУХАНИЯ ЭКСТРУДАТА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Для практической реализации зависимости (6) необходимо знание реологических характеристик применяемых полимеров или композиций на их основе.

В настоящей работе в качестве объектов исследования служили следующие многотоннажные полимеры, широко применяемые в химической промышленности: полиэтилен высокого давления (ПВД) марки 15802-020; полистирол марки ПСМ-115; полипропилен марки 01003; кабельный пластикат марки 040, вязкостные свойства которых хорошо изучены.

Расплавы исследуемых полимеров являются типичными представителями вязкоупругих жидкостей.

Исследования проводились в диапазоне температур от 423 до 503 К, как без вибрационного воздействия на процесс течения, так и с использованием ультразвуковых колебаний. Частота УЗК задавалась в пределах от 18,0 до 24,0 кГц.

Значения плотностей указанных полимеров в зависимости от температуры, согласно [4], сведены в табл. 2.

Таблица 2
Плотность исследуемых полимеров в зависимости от температуры

Исследуемый материал	Температура, К	Плотность, $\text{кг/м}^3 \cdot 10^{-3}$
ПВД марки 15802-020	423	0,7925
Полистирол марки ПСМ-115	493	0,7935
Полипропилен марки 01003	503	0,7535
Кабельный пластикат марки 040	443	1,1825

Исследование реологических свойств вышеуказанных полимеров проводилось на капиллярном вискозиметре на двух капиллярах круглого сечения диаметром 4,2 мм, длиной 50 и 75 мм, изготовленных из стали 45 (ГОСТ 1050) с чистой обработкой внутренней поверхности канала $Ra0,8$.

Входные эффекты исключались с помощью метода двух капилляров Е. В. Бегли, и все необходимые расчеты по вискозиметрии исследуемых расплавов полимеров проводились по методике Г. В. Виноградова [9].

Для проведения экспериментов по получению экструдатов в вышеуказанных формующих каналах использовался промышленный экструдер марки АТЛ-45. Экструдер имеет следующие характеристики: длина червяка 1125 мм и диаметр червяка 45 мм. Экструзионная установка кроме экструдера включает в себя формующий узел, приведенный на рис. 1. Этот узел состоит из присоединительной и формующей головок, причем последняя выполнена в форме квадратного сечения 450×450 мм с возможностью ввертывания формующего канала. Для создания ультразвуковых колебаний на формующую головку было смонтировано два магнитострикционных преобразователя типа ПМС-6-2, связанных с генератором ультразвуковых колебаний УЗГ 1-4. Присоединительная головка необходима для укрепления формующей головки к материалному цилиндру экструдера. Герметичность присоединения головок достигается с помощью алюминиевого кольца. Все конструктивные элементы формующего узла рассчитаны на рабочее давление 25 МПа. Изменение давления обеспечивалось за

счет увеличения числа оборотов червяка посредством регулятора скорости оборотов, который варьирует скорость вращения шнека от 0,0027 до 0,318 рад/с. Диапазон изменения давления от 0 до 25 МПа. Установка имеет гидравлический привод. Материальный цилиндр и формующий узел имеют обогрев, который осуществляется электрическими элементами, включенными через блок автотрансформатором в сеть переменного тока напряжением 220 В.

Контроль давления в головке осуществлялся с помощью манометра. Наряду с ним использовался индикатор двухканальный типа ИД-2И. Контроль и регулирование температуры производились с помощью датчиков ТХК-539, связанных электрически с прибором КСП-4. Наряду с автоматическим регулированием предусматривалось ручное. Регулирование обеспечивало поддержание заданной температуры с точностью до 0,5 °С.

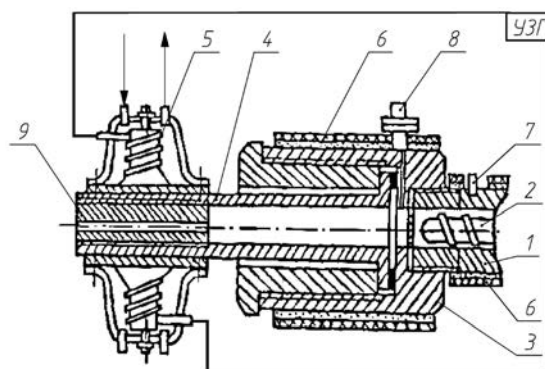


Рис. 1. Формующий узел: 1 – материалный цилиндр экструдера; 2 – червяк; 3 – присоединительная головка; 4 – формующая головка; 5 – магнитострикционные излучатели; 6 – термозлементы; 7 – термометры; 8 – манометр; 9 – сменный канал

Для проведения эксперимента были изготовлены каналы для получения профильных изделий, представленных в табл. 1. Образцы экструдатов, полученные для исследуемых полимеров в различных формующих профильных каналах в интервале температур от 423 до 503 К, были испытаны при различных частотах ультразвуковых колебаний 18,5; 21,6; 22,1; 23,5 кГц.

Эксперимент проводился по следующей методике.

При заданном давлении в пределах (1,0–10,0 МПа) отбирались образцы экструдатов таким образом, чтобы их длина была не менее 50 мм. Образцы помещались после выхода из

формирующего узла в воду, где они находились в течение 30 минут. Это позволяло материалу полностью релаксироваться. Из полученных образцов перпендикулярно их оси вырезались пластинки толщиной не более 1 мм. Срезы экструдата сканировались, после чего измерялась площадь сечения изображения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА РАЗБУХАНИЯ ЭКСТРУДАТА

Разбухание экструдата оценивалось количественно по формуле:

$$K = \sqrt{S_3 / S_k}, \quad (7)$$

где S_3 – площадь поперечного сечения образца экструдата; S_k – площадь поперечного сечения канала.

Результаты исследований представлены в виде графических зависимостей коэффициента разбухания от давления для различных полимеров в формирующих каналах профильного сечения на рис. 2, 3.

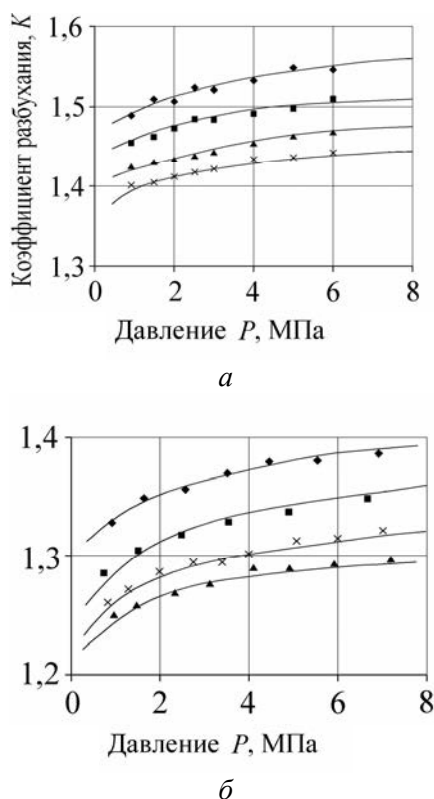


Рис. 2. Зависимость коэффициента разбухания ПВД (*a* – сечение канала – медный полозок, $L = 140$ мм, $T = 493$ К) и кабельного пластиката (*b* – сечение канала – строительный штапик, $L = 140$ мм, $T = 503$ К) от давления: \diamond – без УЗК; \blacksquare – 18,5 кГц; \times – 21,5 кГц; \blacktriangle – 22,1 кГц

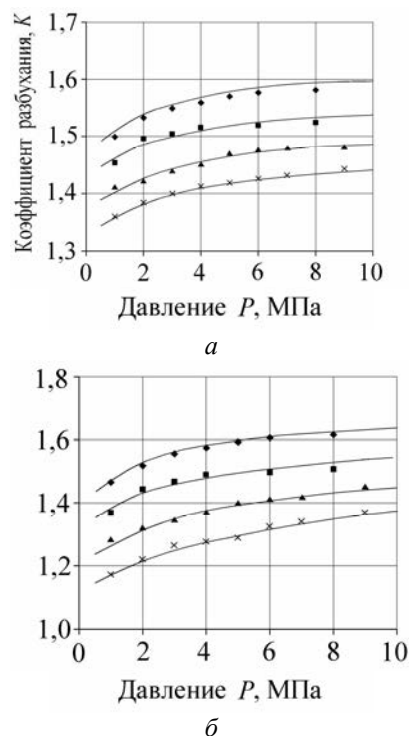


Рис. 3. Зависимость коэффициента разбухания экструдата полистирола (*a* – $T = 423$ К) и полипропилена (*b* – $T = 443$ К) от давления (сечение канала – плинтус, $L = 140$ мм): \diamond – без УЗК; \blacksquare – 18,5 кГц; \times – 21,6 кГц; \blacktriangle – 23,5 кГц

Сплошной линией на графиках изображены значения коэффициентов разбухания рассчитанные по формуле (6); точками представлены экспериментальные данные коэффициентов разбухания, рассчитанные по формуле (7).

ВЫВОДЫ

Сравнение результатов эксперимента и теоретических значений для определения коэффициента разбухания позволило нам выявить следующие закономерности, представленные на рис. 2, 3.

1) Для всех форм исследуемых каналов наблюдается снижение коэффициента разбухания при воздействии ультразвука. Расхождение между теоретическими и экспериментальными данными составляет 14–17%. Наибольшие отклонения отмечены для кабельного пластиката, наименьшие – для полистирола.

2) При анализе частоты ультразвуковых колебаний получены оптимальные значения для полиэтилена, кабельного пластиката и полистирола – 21,6 кГц; для полипропилена – 22,1 кГц.

3) При сравнении формы поперечного сечения каналов необходимо отметить, что наибольшее воздействие ультразвука отмечается для каналов с профилем плинтуса и мебельного

полозка. Объяснить это можно тем, что именно в них наблюдается наличие застойных зон и острых углов и именно при воздействии ультразвука снижается их влияние.

4) По мере увеличения давления темп роста коэффициента разбухания снижается и при давлении экструзии свыше 5,0 МПа его значение практически мало изменяется. Резкое увеличение коэффициента разбухания при малых давлениях является наиболее характерной особенностью для исследуемых полимеров. Это подтверждается в работах авторов [6–8].

5) Для всех исследуемых полимеров характерно уменьшение коэффициента разбухания с ростом длины канала. Это является существенным фактором при конструировании формующего канала.

6) При увеличении температуры наблюдается увеличение коэффициента разбухания. Причем для полистирола это увеличение более заметно, чем для других видов исследуемых полимеров.

Таким образом, полученные закономерности для определения коэффициента разбухания, подтвержденные как теоретически, так и экспериментально, могут быть использованы при расчете формующего инструмента. В большей степени эти исследования могут быть применимы при проведении процессов свободной экструзии, при которой изделие, вышедшее из формующей головки, не соприкасается с калибрующим инструментом, не подвергается вытяжке и механической обработке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фридман М. Л.** Технология переработки кристаллических полиолефинов. М.: Химия, 1977. 398 с.
2. **Хан Ч. Д.** Реология в процессах переработки полимеров. М.: Химия, 1979. 396 с.
3. **Новицкий Б. Г.** Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. М.: Химия, 1983. 100 с.
4. **Панов А. К., Анасов А. Р.** Гидродинамика потоков аномально-вязких полимерных систем в формующих каналах. Уфа: УГНТУ, 1994. 260 с.

5. **Коугия Ф. А.** Методика расчета коэффициента разбухания полимерной струи на выходе из насадки // Каучук и резина. 1995. № 2. С. 45–46.

6. **Макаров В. Г., Апухтина М. В.** Особенности отверждения эпоксидиановых олигомеров в ультразвуковом поле // Пластические массы. 1990. № 9. С. 42–43.

7. **Киселева О. Ф., Панов А. К.** Особенности высокоэластичного восстановления расплавов полимеров при течении в призматических каналах в условиях ультразвуковых колебаний // Актуальные вопросы механики, электроники, физики земли и нейтронных методов исследования: Всероссийск. науч. конф. Стерлитамак: СГПА, 1997. С. 26–28.

8. **Киселева О. Ф., Панов А. К.** Воздействие ультразвуковых колебаний на процесс разбухания струи расплавов полимеров при истечении из каналов сложного профиля сечения // XX Межвузовск. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и преподавателей «Наука – производству». Уфа: УГНТУ, 1998. С. 40–42.

9. **Виноградов Г. В., Прозоровская Н. В.** Исследование расплавов полимеров на капиллярном вискозиметре постоянных давлений // Пластические массы. 1964. № 5. С. 50–57.

ОБ АВТОРАХ



Панов Александр Александрович, нач. механ. бюро ПКО ОАО «Сода». Канд. техн. наук (УГНТУ, 2002). Иссл. в обл. расчетов и моделирования в аппаратостроении.



Жернаков Владимир Сергеевич, проф., зав. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1992). Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела.