

УДК 621.315

А.Е. Терлыч, Н.М. Труфанова, А.Г. ЩербининПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ**

Технологический процесс переработки пластмасс с использованием пластицирующего экструдера носит сложный, нелинейный характер и существенно зависит от реологических свойств материала, а также от условий его переработки. В представленной работе приведены результаты экспериментального исследования влияния условий переработки полимера и его реологических свойств на такие выходные параметры процесса, как расход, давление, средняя температура расплава на выходе экструдера и др. В таблицах приведены экспериментально определенные реологические свойства некоторых поливинилхлоридных пластикаторов, широко используемых при производстве кабельной продукции, и значения выходных параметров процесса в зависимости от условий переработки для каждого из материалов. Также приведены графические зависимости выходных параметров процесса от условий переработки и реологических свойств перерабатываемых материалов. Полученные результаты позволяют сделать выводы о существенном влиянии на процесс экструзии аномалии вязкости, присущей большинству термопластов.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, реологические свойства, процесс экструзии.

A.Y. Terlych, N.M. Trufanova, A.G. Shcherbinin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**EXPERIMENTAL RESEARCH AND ANALYSIS
OF EXTRUSION PROCESS**

Technological process of plastic recycling using plasticizing extruder is of complex, nonlinear character and essentially depends on rheological material properties as well as material recycling environment. In the paper submitted the experimental research results concerning the effect of polymer recycling environment and its rheological properties on such output process parameters as flow rate, pressure, an average melt temperature at the extruder exit and others have been presented. Experimentally determined rheological properties of some polyvinylchloride plasticators widely used by cable products manufacturing and the values of the output process parameters depending on recycling environment for every kind of the materials have been given in the tables. Also graphic relations of the output process parameters to recycling environment and rheological properties of the recycled materials have been shown. The results obtained allow us to draw the conclusion that viscosity anomaly, inherent in the majority of thermoplastics has a substantial impact on the extrusion process.

Keywords: experimental research, rheological properties, extrusion process.

Целью экспериментального исследования процесса экструзии было определение влияния условий переработки полимера и его реологических свойств на такие выходные параметры процесса, как расход, давление, средняя температура расплава на выходе экструдера, потребляемая электроприводом мощность. Необходимость такого исследования вызвана отсутствием в литературных источниках полной картины комплексного описания влияния условий переработки и реологии перерабатываемого полимера на указанный ряд выходных параметров процесса.

Первоначально было проведено экспериментальное исследование реологических свойств нескольких марок ПВХ-пластиката, наиболее широко используемых при изготовлении электрических кабелей, которые предполагалось подвергнуть переработке на лабораторном экструдере при различных условиях.

При моделировании процессов течения расплавов полимеров наиболее часто используются феноменологические модели течения жидкостей, что объясняется относительной простотой таких моделей, их высокой точностью описания поведения жидкости и возможностью экспериментального определения параметров моделей, что важно при использовании их в инженерной практике. Поэтому в качестве реологического уравнения использовалось выражение, в котором зависимость вязкости от скорости сдвига определялась степенным законом, а от температуры – уравнением Рейнольдса [1–3]:

$$\mu_{\text{э}} = \mu_0 \exp(-\beta(T - T_0)) \left(\frac{I_2}{2} \right)^{\frac{(n-1)}{2}},$$

где μ – эффективная вязкость; μ_0 – начальная вязкость; β – температурный коэффициент; I_2 – второй инвариант тензора скоростей деформаций; n – показатель аномалии вязкости; T – температура; μ_0 – коэффициент консистенции при $T = T_0$.

Для определения реологических характеристик расплавов полимеров была использована методика проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных [4]. В табл. 1 приведены реологические характеристики исследованных полимерных материалов.

Таблица 1

Реологические характеристики ПВХ-пластиката различных марок

Марка	$\mu_0, \text{Па}\cdot\text{с}^n$	n	$\beta, 1/^\circ\text{C}$	$T_0, ^\circ\text{C}$
И 40-13	64433	0,5625	0,0965	170
И 40-14	72251	0,4266	0,0928	170
НП 30-32	40013	0,4146	0,0812	170
О 40	50980	0,4116	0,0933	160
ППИ 30-30	32221	0,3302	0,0637	170
ППО 30-35	26287	0,3316	0,0369	160

Из полученных результатов видно, что материалы имеют значительный разброс начальной вязкости, которая может достигать для материала И 40-14 значения более $72\ 000 \text{ Па}\cdot\text{с}^n$, а расплавы материалов ППИ 30-30 и ППО 30-35 демонстрируют резко неньютоновское поведение.

Далее материалы с известными реологическими свойствами были подвергнуты переработке на лабораторном экструдере в широком диапазоне значений технологических характеристик, таких как распределение температуры корпуса экструдера и скорость вращения шнека.

Схема лабораторного экструдера, использованного в эксперименте, приведена на рис. 1. Экструдер был оснащен классическим шнеком диаметром 32 мм с шагом нарезки червяка 20 мм и линейно изменяющейся глубиной канала от 6 мм в зоне загрузки до 1,5 мм в конце зоны дозирования. Конструкция шнека приведена на рис. 2. В качестве нагрузки экструдера использовалась головка, конструкция которой приведена на рис. 3.

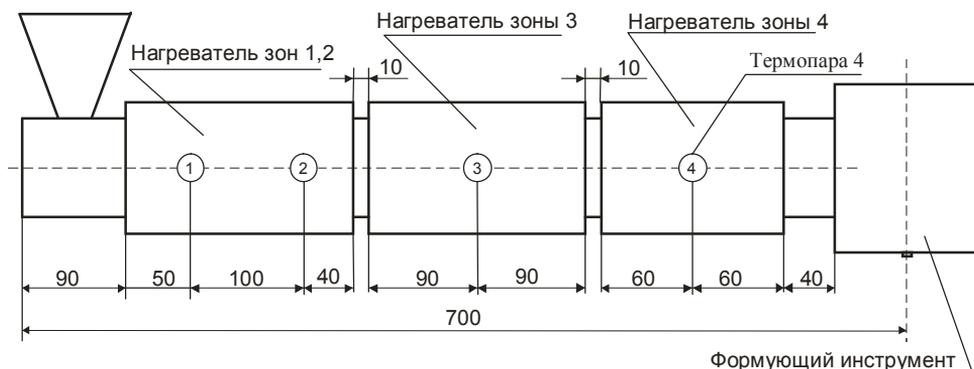


Рис. 1. Схема лабораторного экструдера

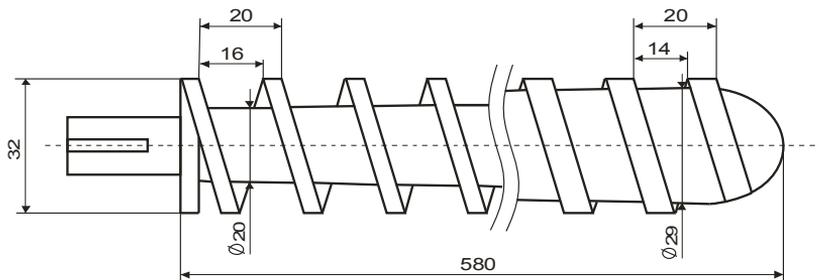


Рис. 2. Конструкция шнека

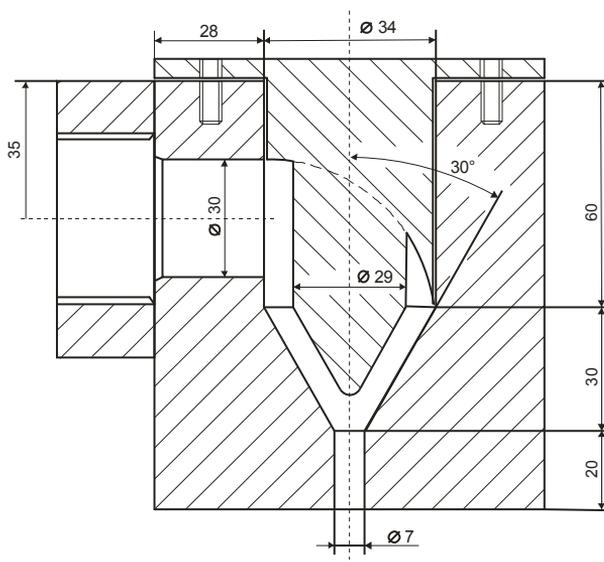


Рис. 3. Формующий инструмент

Влияние температуры корпуса на параметры процесса экструзии исследовалось для двух типовых профилей температуры корпуса по зонам. Значения температур по зонам для обоих случаев приведены в табл. 2.

Таблица 2

Температурные профили корпуса экструдера

№ профиля	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$	$T_4, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{ГОЛОВКИ}}, ^\circ\text{C}$
1	110	120	145	145	145
2	110	120	160	160	160

Полученные экспериментальные значения параметров процесса экструзии при переработке различных материалов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Экспериментальные значения параметров процесса экструзии

Марка материала	№ профиля	N , об/мин	$T_{ср}$, °C	P , бар	$S_{привода}$, Вт	G , кг/ч
И 40-14	1	35	151,6	60,0	1185	4,74
		25	152,6	50,5	833	3,30
		15	147,3	42,6	508	2,04
	2	35	166,5	39,5	1260	4,65
		25	166,5	34,0	850	3,30
		15	165,8	27,7	506	1,92
О-40	1	35	145,0	39,8	1150	4,92
		25	150,1	33,0	775	3,60
		15	145,4	28	480	2,28
	2	35	159,7	15,6	1175	5,10
		25	163,2	7,5	800	3,60
		15	165,3	3,9	460	2,34
И 40-13	1	35	153,3	53,5	1315	4,55
		25	154,8	47,1	920	3,21
		15	146,2	43,6	514	1,86
	2	35	168,6	32,8	1430	4,3
		25	167,2	31,0	980	3,15
		15	165,7	26,5	560	1,86
ППИ 30-30	1	35	147,8	67,0	1180	6,00
		25	147,0	60,0	825	4,23
		15	145,3	47,0	475	2,67
	2	35	159,8	34,0	1160	5,97
		25	165,4	23,0	760	4,26
		15	163,1	16,4	470	2,67
ППО 30-35	1	35	144,1	38,0	1155	6,27
		25	145,0	30,5	770	4,56
		15	141,8	23,7	475	2,87
	2	35	157,5	25,3	1040	6,27
		25	162,8	16,8	710	4,56
		15	161,1	12,5	445	2,78
НГП 30-32	1	35	146,1	42,0	1280	4,35
		25	148,7	34,7	1000	3,30
		15	143,4	30,0	570	1,95
	2	35	166,3	23,0	1280	4,20
		25	165,0	18,5	920	3,27
		15	163,7	15,0	570	2,04

По результатам эксперимента был построен ряд зависимостей, связывающих условия переработки полимеров и выходные параметры процесса экструзии.

На рис. 4 показана зависимость давления на выходе экструдера от скорости вращения шнека. Из рисунка видно, что при переработке изоляционных марок ПВХ-пластиката (ППИ 30-30, И 40-14, И 40-13) развивается существенно большее давление по отношению к оболочечным (О 40, ППО 30-35, НГП 30-32).

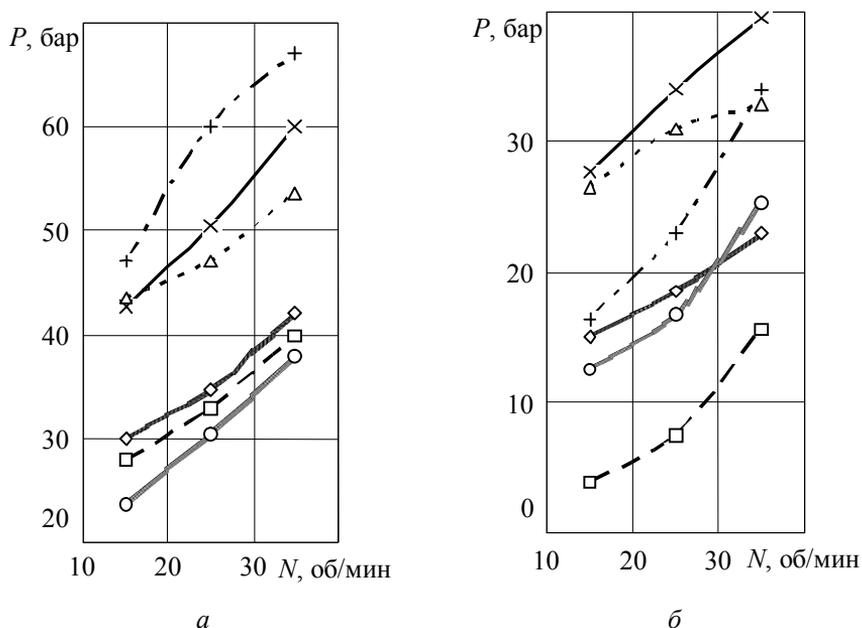


Рис. 4. Зависимость давления на выходе экструдера от скорости вращения шнека для температурного профиля 1 (а) и профиля 2 (б):

—+— ППИ 30-30, —x— И 40-14, —Δ— И 40-13,
—◇— НГП 30-32, —□— О 40, —○— ППО 30-35

На рис. 5 приведена зависимость средней температуры на выходе из формующего инструмента от скорости вращения шнека.

Характер нелинейной зависимости средней температуры объясняется влиянием аномалии вязкости материала на диссипацию механической энергии. С ростом скорости вращения шнека увеличивается скорость сдвига в канале экструдера, что приводит к уменьшению эффективной вязкости расплава полимера и, как следствие, к снижению диссипации и температуры.

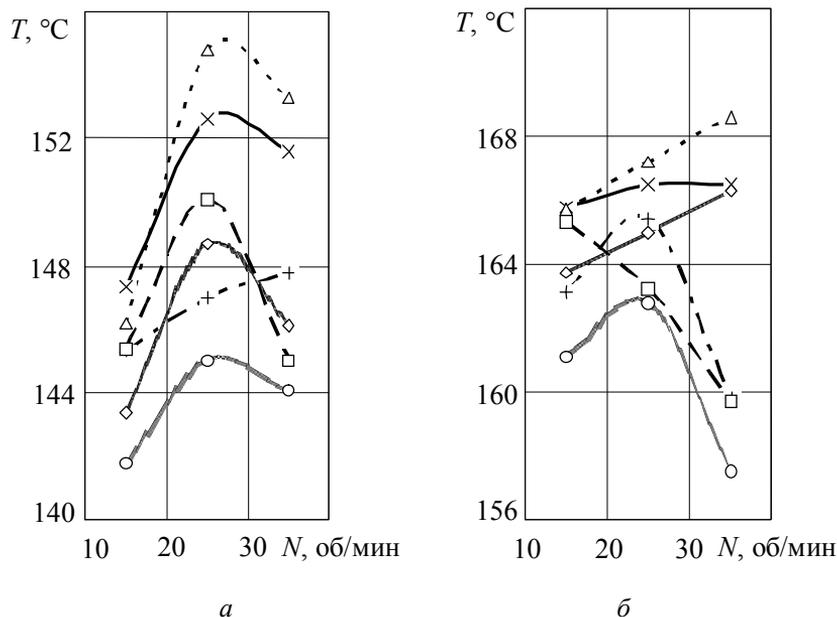


Рис. 5. Зависимость средней температуры на выходе из формующего инструмента от скорости вращения шнека для температурного профиля 1 (а) и профиля 2 (б):

—+— ППИ 30-30, —x— И 40-14, - -Δ- И 40-13,
—◇— НГП 30-32, —□— О 40, —○— ППО 30-35

На рис. 6 приведена зависимость расхода от скорости вращения шнека. Зависимость носит практически линейный характер для всех марок ПВХ-пластиката. Из рисунка также видно, что отличия в реологических свойствах материалов оказывают заметное влияние на величину расхода, развиваемого экструдером при одной и той же скорости вращения шнека. Влияние реологических свойств материала на расход носит сложный комплексный характер.

На рис. 7 приведена зависимость мощности, потребляемой электроприводом экструдера от скорости вращения шнека, которая также носит практически линейный характер для всех использованных в эксперименте материалов, однако существенно зависит от реологических свойств полимера.

В табл. 3 также отражена связь реологических свойств перерабатываемого полимера с выходными параметрами процесса экструзии.

На основании табличных данных может быть построена регрессионная модель процесса экструзии для каждого из выходных параметров процесса:

$$\begin{cases} P = \Phi_1(\mu_0, n, \beta, N, T_b), \\ T_{cp} = \Phi_2(\mu_0, n, \beta, N, T_b), \\ G = \Phi_3(\mu_0, n, \beta, N, T_b), \\ S = \Phi_4(\mu_0, n, \beta, N, T_b), \end{cases}$$

где N – значение скорости вращения шнека; T_b – температура корпуса экструдера; $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$ – операторы модели.

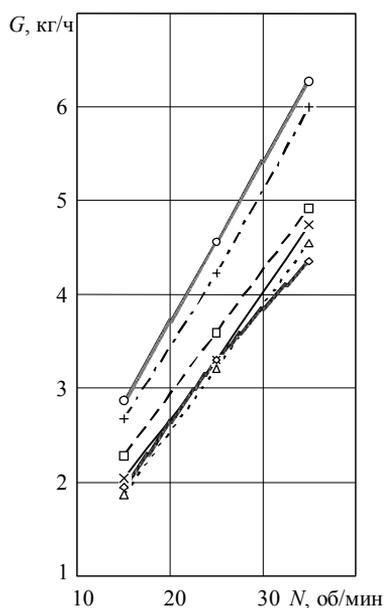


Рис. 6. Зависимость расхода от скорости вращения шнека для температурного профиля 1:

—+— ППИ 30-30, —x— И 40-14, · · · · И 40-13,
—○— НГП 30-32, —□— О 40, —○— ППО 30-35

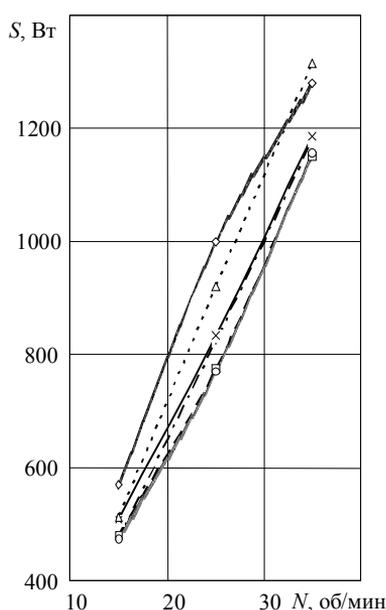


Рис. 7. Зависимость мощности, потребляемой электроприводом экструдера от скорости вращения шнека:

—+— ППИ 30-30, —x— И 40-14, · · · · И 40-13,
—○— НГП 30-32, —□— О 40, —○— ППО 30-35

Параметры операторов имитационной модели были определены с помощью метода наименьших квадратов по экспериментальным данным в предположении, что операторы имеют вид

$$\Phi_i = \alpha_1 + \alpha_2\mu + \alpha_3n + \alpha_4\beta + \alpha_5N + \alpha_6N^2 + \alpha_7T_b.$$

Характер полученных зависимостей для скорости вращения шнека $N = 25$ об/мин и температурного профиля 1 приведен на рис. 8.

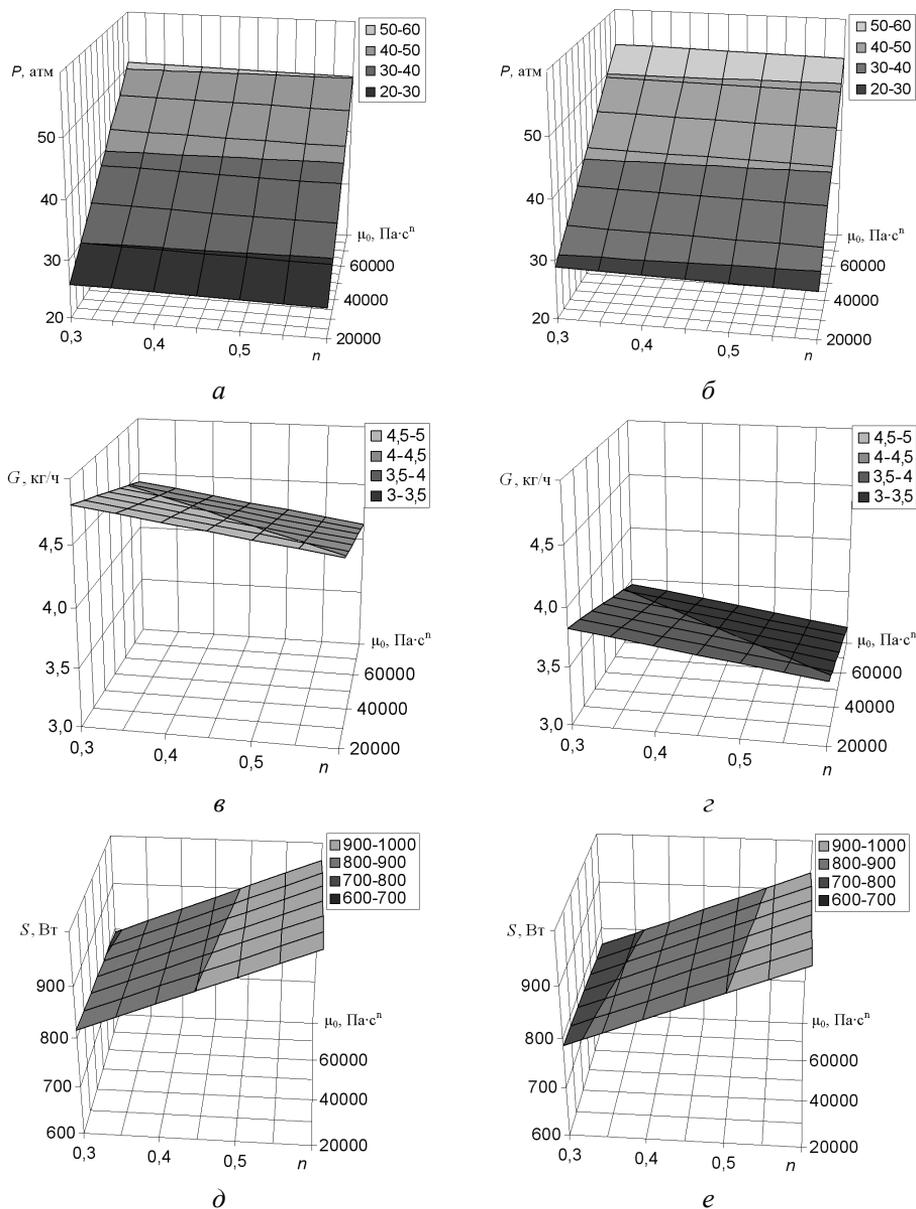


Рис. 8. Зависимость выходных параметров процесса экструзии от реологических характеристик перерабатываемого полимера: *a*, *б* – давления на выходе; *в*, *г* – расхода; *д*, *е* – мощности, потребляемой приводом экструдера; *ж*, *з* – средней температуры на выходе головки при $\beta = 0,03$ °C⁻¹ и $\beta = 0,09$ °C⁻¹ соответственно при $N = 25$ мин⁻¹ и температурном профиле 1 (см. также с. 16)

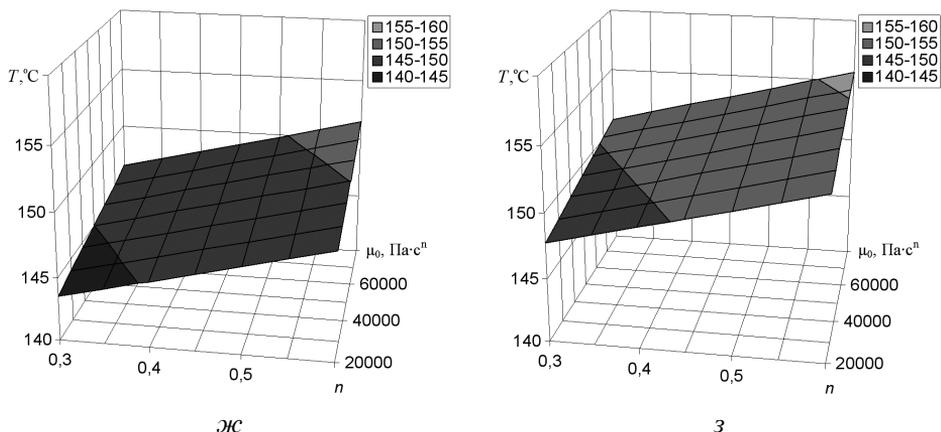


Рис. 8. Окончание

Из рис. 8 видно, что реологические свойства перерабатываемого полимера имеют существенное влияние на выходные параметры процесса экструзии. Так, давление на выходе экструдера значительно возрастает с ростом начальной вязкости полимера (см. рис. 8, а). Увеличение температурного коэффициента вязкости также заметно приводит к росту давления на выходе экструдера (см. рис. 8, а, б). На величину расхода влияют как аномалия вязкости, так и начальная вязкость, однако влияние температурного коэффициента вязкости здесь значительно преобладает (см. рис. 8, в, г). Мощность на валу экструдера уменьшается при уменьшении показателя аномалии вязкости, что объясняется снижением диссипации механической энергии при усилении аномального поведения расплава (см. рис. 8, д, е). Средняя температура на выходе экструдера возрастает с ростом μ_0 и n , так как в этом случае возрастает и диссипация энергии в более вязком расплаве (см. рис. 8, ж, з). Существенное влияние на среднюю температуру расплава оказывает и температурный коэффициент вязкости, с ростом которого она увеличивается.

Библиографический список

1. Мидлман С. Течение полимеров. – М.: Мир, 1971. – 260 с.
2. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
3. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1977. – 460 с.

4. Терлыч А.Е., Щербинин А.Г., Труфанова Н.М. Экспериментальное определение реологических характеристик блоксополимера этилена с пропиленом // Информационные управляющие системы: сб. науч. тр. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2000. – С. 52–56.

Сведения об авторах

Терлыч Андрей Евгеньевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

Труфанова Наталия Михайловна (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

Щербинин Алексей Григорьевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

About the authors

Terlych Andrey Yevgenyevich (Perm, Russian Federation) – PhD of technical sciences, assistant lecturer at the department of design and technologies in electrical engineering of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ktei@pstu.ru).

Trufanova Natalia Mikhailovna (Perm, Russian Federation) – Doctor of technical sciences, professor, head of the department of design and technologies in electrical engineering of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ktei@pstu.ru).

Shcherbinin Alexei Grigoryevich (Perm, Russian Federation) – Doctor of technical sciences, professor at the department of design and technologies in electrical engineering of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: ktei@pstu.ru).

Получено 05.09.2013