

УДК 532.5

С.В. Ершов, А.Г. Щербинин, А.Е. ТерлычПермский научный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ ПОЛИМЕРОВ**

Предложена методика определения реологических характеристик полимерных материалов на серийном приборе ИИРТ-АМ, используемом для определения показателя текучести расплава. Данная методика позволяет определять зависимости вязкости от скорости сдвига и температуры. Проведены экспериментальные исследования реологических свойств расплава полиэтилена низкой плотности марки 153-01К и расплава полиэтилена высокой плотности марки 271-274К, предназначенных для наложения изоляции и оболочек кабелей методом экструзии. Получено: исследуемые расплавы полимеров относятся к псевдопластическим жидкостям с близкими значениями показателей аномалии вязкости; при температуре 170 °С вязкость расплава полиэтилена марки 271-274К выше вязкости расплава полиэтилена марки 153-01К примерно в 1,5 раза; температурный коэффициент вязкости в уравнении Рейнольдса полиэтилена 153-01К вдвое превышает температурный коэффициент вязкости полиэтилена 271-274К.

Ключевые слова: реологические свойства, полимеры, показатель текучести расплава.

S.V.Ershov, A.G.Shcherbinin, A.E.Terlych

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**RESEARCH OF REOLOGICAL PROPERTIES
OF ELECTRICAL INSULATING POLYMERS**

The method of determining the rheological characteristics of polymer materials in IIRT-AM production unit, used to determine the melt flow index is proposed. The given technique allows to define dependences of viscosity on shear rate and temperature. Experimental research of rheological properties of polyethylene melt of low density 153-01K and polyethylene melt of high density 271-274K, intended for imposing of isolation and covers of cables by an extrusion method is carried out. It is stated that: investigated melts of polymers concern pseudo-plastic liquids with close values of indicators of anomaly of viscosity; at temperature 170°C viscosity of melt of polyethylene 271-274K is higher then viscosity of melt of polyethylene 153-01K approximately in 1,5 times; temperature factors of viscosity in Reynolds's equation of polyethylene 153-01K exceeds twice temperature factors of viscosity of polyethylene 271-274K.

Keywords: rheological properties, polymers, the melt flow index.

Среди многочисленных способов переработки полимеров наиболее распространенным является метод экструзии. Одним из основных инструментов исследования процессов переработки полимерных мате-

риалов на экструзионном оборудовании является математическое моделирование. Знание реологических и теплофизических свойств исследуемых материалов необходимо для адекватной работы математических моделей.

Исследования реологических свойств электроизоляционных полимеров проведены на серийном приборе ИИРТ-АМ, предназначенном для измерения малоинформативного показателя текучести расплава, определяемого при одной температуре и одном грузе по ГОСТ 11645-73. Показатель текучести расплава численно равен количеству материала в граммах, вытекшего через цилиндрический канал за 10 мин (рис. 1).

Для определения реологических характеристик расплава полимера на приборе ИИРТ-АМ были разработаны методика проведения эксперимента и методика обработки экспериментальных данных [1]. На рис. 1 представлена схема рабочей камеры прибора ИИРТ-АМ.

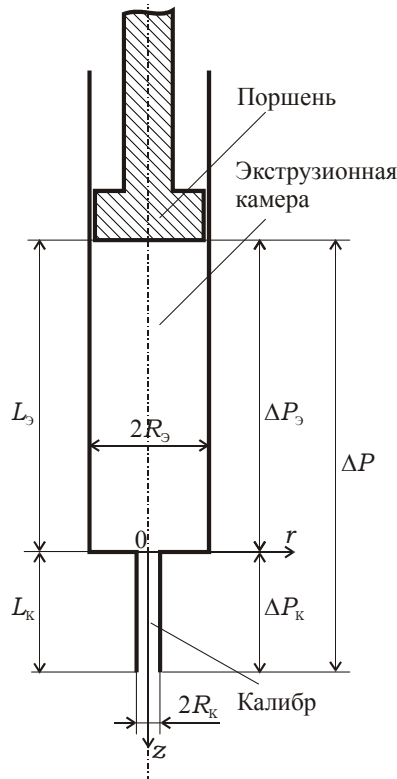


Рис. 1. Схема рабочей камеры прибора ИИРТ-АМ

Методика проведения эксперимента заключается в следующем: при фиксированной температуре и установленной массе груза, прикладываемого к поршню, и заданном перемещении поршня определяется количество вытекшего материала, время его истечения и перепад давления в калибре. Далее эксперимент выполняется для другой массы груза. Всего комплект грузов содержит восемь навесок в диапазоне от 0,325 до 21,6 кг. После этого эксперимент повторяется при другом значении температуры. Для повышения точности измерений при определении перепада давления в калибре учитывается падение давления в экструзионной камере в соответствии с местоположением поршня.

При построении методики обработки экспериментальных данных рассматривается изотермическое стационарное установившееся течение без проскальзывания несжимаемой неньютоновской жидкости в цилиндрическом калибре радиусом R_k (см. рис. 1) под действием перепада давления. Процесс движения жидкости в калибре описывается уравнениями [2]

$$\tau_{rz} = \frac{r}{2} \frac{dP}{dz} \frac{1}{2}, \quad (1)$$

$$\tau_{rz} = \mu_3 \dot{\gamma}_{rz}, \quad (2)$$

$$\mu_3 = \mu_0 \left(\frac{I_2}{2} \right)^{\frac{n-1}{2}} = \mu_0 \left(\frac{I_2}{2} \right)^{\frac{1-s}{2s}} = \mu_0 |\dot{\gamma}_{rz}|^{n-1}, \quad (3)$$

где τ_{rz} – напряжение сдвига; dP/dz – градиент давления; μ_3 – эффективная вязкость; μ_0 – коэффициент консистенции расплава полимера;

I_2 – второй инвариант тензора скоростей деформации, $I_2 = 2 \left(\frac{dv_z}{dr} \right)^2$;

$\dot{\gamma}_{rz} = \frac{dv_z}{dr}$; v_z – скорость движения полимера; n – показатель аномалии

вязкости; $s = 1/n$ – коэффициент аномалии.

После преобразования уравнений (1)–(3) получено выражение, связывающее объемный расход с градиентом давления в калибре,

$$Q = \frac{\pi \cdot R_k^{s+3}}{2^s \mu_0^s (s+3)} \left(\frac{dP}{dz} \right). \quad (4)$$

Перепад давления в рабочей камере ΔP находится по формуле

$$\Delta P = \frac{gM}{\pi R_3^2}, \quad (5)$$

где M – масса груза вместе с поршнем и держателем; g – ускорение свободного падения.

Градиент давления в экструзионной камере рассчитывается как $\frac{dP}{dz} = \frac{\Delta P_3}{L_3}$, а в калибре – $\frac{dP}{dz} = \frac{\Delta P_k}{L_k}$. Тогда по формуле (4) расход в экструзионной камере определяется по выражению

$$Q_3 = \frac{\pi \cdot R_k^{s+3}}{2^s \mu_0^s (s+3)} \left(\frac{\Delta P_3}{L_3} \right)^s, \quad (6)$$

а в калибре по выражению

$$Q_k = \frac{\pi \cdot R_k^{s+3}}{2^s \mu_0^s (s+3)} \left(\frac{\Delta P_k}{L_k} \right)^s. \quad (7)$$

Зная массу вытекающего материала – m , плотность полимера – ρ и время истечения – τ , объемный расход полимера Q можно определить по формуле

$$Q = Q_3 = Q_k = \frac{m}{\tau \cdot \rho}. \quad (8)$$

Из уравнений (6) и (7) при условии, что $Q_3 = Q_k$ и $\Delta P = \Delta P_3 + \Delta P_k$, получим выражение для определения перепада давления в калибре ΔP_k

$$\Delta P_k = \frac{\Delta P}{1 + \frac{L_3}{L_k} \left(\frac{R_k}{R_3} \right)^s}. \quad (9)$$

Методики проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных учитывают изменение активной длины экструзионной камеры L_3 в формуле (9), которая определяется местоположением поршня.

Реологические характеристики расплава полимера на приборе ИИРТ-АМ с учетом вышеприведенных выкладок могут быть получены следующим образом.

После логарифмирования уравнения (7) получим

$$\ln(Q) = b_0 + s \ln(\Delta P_k), \quad (10)$$

где

$$b_0 = \ln \left(\frac{\pi \cdot R_k^{s+3}}{(2\mu_0 L_k)^s (s+3)} \right). \quad (11)$$

Параметры линейного уравнения (10) b_0 и s рассчитываются в результате обработки экспериментальных данных для $\ln(Q)$ и $\ln(\Delta P_k)$.

Поскольку величина s в выражении (9), используемая для определения экспериментального значения перепада давления ΔP_k , изначально неизвестна, для нахождения параметров уравнения (10) организуется итерационная процедура. На первом шаге предполагается, что $s^{(1)} = 1$. Далее, по результатам эксперимента определяются $\ln(Q)$ и $\ln(\Delta P_k^{(1)})$. После обработки полученных экспериментальных данных методом наименьших квадратов рассчитываются параметры b_0 и $s^{(2)}$.

Для нового значения $s^{(2)}$ перевычисляется величина $\ln(\Delta P_k^{(2)})$ и находится отношение $\frac{|\Delta P_k^{(2)} - \Delta P_k^{(1)}|}{\Delta P}$. Если $\frac{|\Delta P_k^{(2)} - \Delta P_k^{(1)}|}{\Delta P}$ меньше некоторой наперед заданной малой величины ε , то итерационная процедура останавливается и $s = s^{(2)}$, если нет, то повторяется до тех пор, пока не выполнится заданное условие.

Коэффициент консистенции μ_0 в выражении (3) определяется из уравнения (11).

Температурная зависимость коэффициента консистенции описывается уравнением Рейнольдса [2]

$$\mu_0(T) = \mu_0(T_0) \exp(-\beta(T - T_0)), \quad (12)$$

где T – температура; β – температурный коэффициент вязкости; $\mu_0(T_0)$ – значение коэффициента консистенции при температуре T_0 .

Для определения зависимости коэффициента консистенции от температуры проводится аналогичная обработка результатов эксперимента, полученных на приборе ИИРТ-АМ для различных значений температуры. После логарифмирования уравнения (12) получается уравнение прямой

$$\ln(\mu_0(T)) = \ln(\mu_0(T_0)) - \beta(T - T_0), \quad (13)$$

параметры которого определяются по результатам эксперимента методом наименьших квадратов.

Таким образом, с помощью разработанной методики определяются параметры зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига и температуры:

$$\mu_s = \mu_0 \exp(-\beta(T - T_0)) |\dot{\gamma}|^{n-1}. \quad (14)$$

Исследования реологических характеристик проведены для полиэтилена высокого давления (низкой плотности) марки 153-01К и полиэтилена низкого давления (высокой плотности) марки 271-274К, предназначенных для наложения изоляции, оболочек и защитных покровов проводов и кабелей методом экструзии

В табл. 1 приведены плотность и показатель текучести расплава рассматриваемых материалов.

Таблица 1

Паспортные характеристики материалов

Наименование показателя	ПЭ 153-01К	ПЭ 271-274К
Плотность, г/см ³	0,9185–0,922	0,950–0,955
Показатель текучести расплава, г/10 мин	0,21–0,39	0,30–0,65

Из таблицы видно, что показатель текучести расплава полиэтилена 271-274К примерно в 1,5 раза больше, чем для полиэтилена 153-01К.

Измерение реологических характеристик проведены в диапазоне изменения температуры от 170 до 250 °С с шагом в 10 °С. При фиксированной температуре, определены экспериментальные значения расхода расплава полиэтилена от перепада давления. После обработки экспериментальных данных получены расчетные зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига, графики которых представлены на рис. 2, а, б для полиэтилена 153-01К и для полиэтилена 271-274К соот-

ответственно. Из рисунков видно, что вязкость исследуемых материалов с увеличением скорости сдвига падает, поэтому исследуемые расплавы полимеров относятся к псевдопластическим жидкостям. Тангенсы углов наклона зависимостей в логарифмических координатах численно равны $n - 1$.

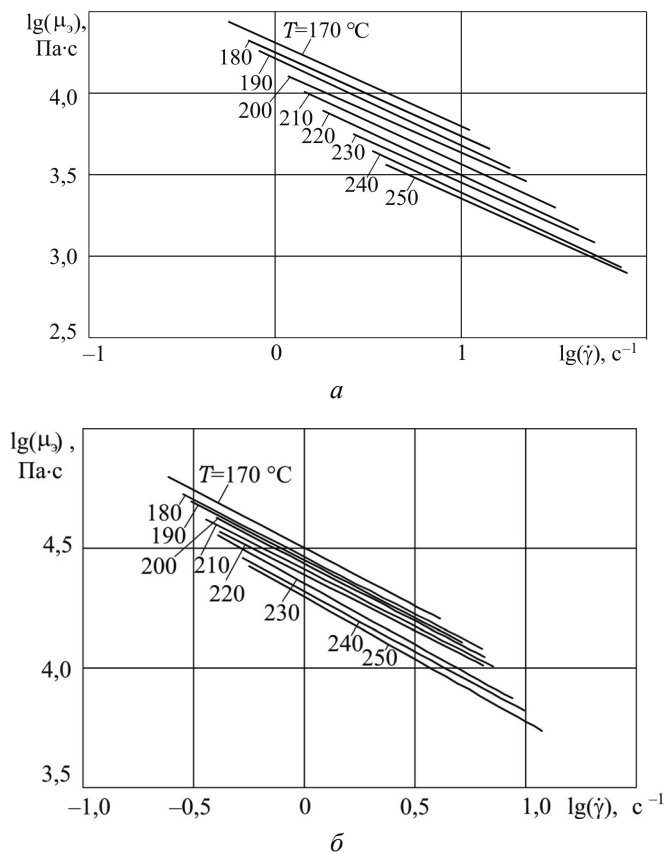
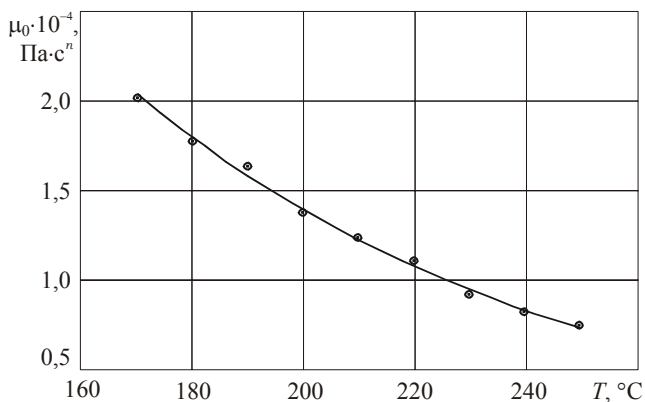
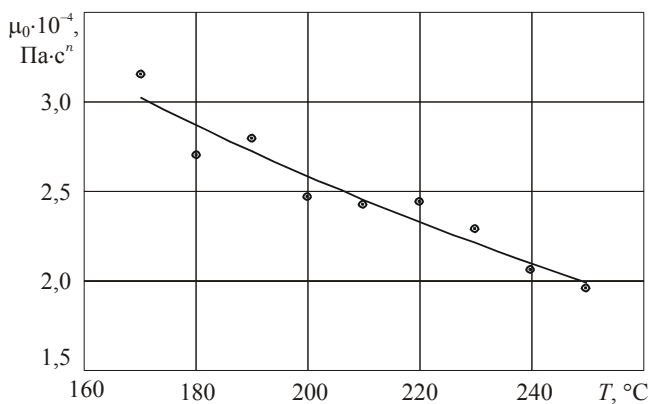


Рис. 2. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига в двойных логарифмических координатах: *a* – полиэтилен марки 153-01К; *б* – полиэтилен марки 271-274К

На рис. 3 показана зависимость коэффициента консистенции расплавов полимера от температуры исследуемых материалов. Экспериментальные данные получены на приборе ИИРТ-АМ, расчетные кривые построены после обработки экспериментальных данных по формуле (12). При увеличении температуры вязкость падает, что достаточно хорошо описывается экспоненциальной зависимостью уравнения Рейнольдса (12).



а



б

Рис. 3. Зависимость коэффициента консистенции от температуры расплава, а – полиэтилен марки 153-01К; б – полиэтилен марки 271-274К

В табл. 2 представлены реологические характеристики исследуемых материалов, полученные после обработки первичных экспериментальных данных.

Из таблицы видно, что коэффициент консистенции для полиэтилена 271-274К примерно в 1,5 раза больше, чем для полиэтилена 153-01К, что хорошо согласуется с паспортными данными на исследуемые материалы. Показатели аномалии вязкости исследуемых материалов достаточно близки. Большее отличие наблюдается между температурными коэффициентами вязкости.

Реологические характеристики

Исследуемый материал	Коэффициент консистенции μ_0 при $T = 170 \text{ }^\circ\text{C}$, Па·с ⁿ	Температурный коэффициент вязкости β , 1/°C	Коэффициент аномалии s	Показатель аномалии вязкости n
153-01К	20200	0,012	2,06	0,485
271-274К	29500	0,005	1,99	0,502

Таким образом, разработанная методика определения реологических характеристик полимерных материалов на приборе ИИРТ-АМ, используемом на кабельных предприятиях для измерения малоинформативного показателя текучести расплава, позволяет более качественно проводить входной контроль поставляемых полимерных материалов. С помощью предложенной методики можно получать реологические характеристики полимеров, определять аномальные свойства расплавов, температурную зависимость вязкости. Результаты эксперимента можно использовать в математических моделях движения и теплообмена полимерных материалов в винтовых каналах экструзионного оборудования [3–5] с целью более эффективного подбора технологических режимов с учетом реальных реологических свойств перерабатываемых полимеров.

Библиографический список

1. Терлыч А.Е., Щербинин А.Г., Труфанова Н.М. Экспериментальное определение реологических характеристик блоксополимера этилена с пропиленом // Информационные управляющие системы : сб. науч. тр. / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2000. – С. 52–56.
2. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984.
3. Янков В.И., Труфанова Н.М., Щербинин А.Г. Неизотермическое течение полимерных жидкостей в винтовых уплотнениях с продольной циркуляцией // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2006. – № 3. – С. 12–15.
4. Янков В.И., Труфанова Н.М., Щербинин А.Г. Изотермическое течение аномально-вязких жидкостей в винтовых уплотнениях с про-

дольной циркуляцией // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2006. – № 6. – С. 3–5.

5. Щербинин А.Г., Труфанова Н.М., Янков В.И. Пространственная математическая модель одночервячного пластицирующего экструдера. Сообщение 3. Проверка адекватности модели // Пластические массы. – 2005. – № 5. – С. 43–45.

References

1. Terlych A.E., Scherbinin A.G., Trufanova N.M. Eksperimentalnoe opredelenie reologicheskikh kharakteristik bloksopolimera etilena s propilenom [Experimental determination of the rheological characteristics of the block copolymer of ethylene and propylene]. *Informatsionnye upravlyayushchie sistemy: sb. nach. tr.* Perm gos. tekhn. un-t. Perm, 2000, pp. 52–56.

2. Tadmor Z, Gogos K. Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov [Theoretical Foundations of polymer processing]. – Moscow: Khimiya, 1984.

3. Jankov V.I, Trufanova N.M., Scherbinin A.G. Neizotermicheskoe techenie polymernykh zhidkostey v vintovykh uplotneniyakh s pridolnoy tsirkulyatsiyey [Non-isothermal flow of polymer liquids in screw seals with longitudinal circulation]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie.* 2006. No. 3, pp. 12–15.

4. Jankov V.I, Trufanova N.M., Scherbinin A.G. Izotermicheskoe techenie anomalno-vyazkikh zhidkostey v vintovykh v vintovykh uplotneniyakh s pridolnoy tsirkulyatsiyey [Isothermal flow of anomalously viscous liquids in screw seals with longitudinal circulation]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie.* 2006. № 6. p. 3–5.

5. Scherbinin A.G., Trufanova N.M., Jankov V.I. Prostranstvennaya matematicheskaya model odnochervyachnogo plastitsiruyushchego ekstrudera. Soobsh. 3. Proverka adekvatnosti modeli [Spatial mathematical model of one-worm plasticizing extruder. The report No. 3. Check of adequacy of model]. *Plasticheskie massy*, No. 5, 2005, pp. 43–45.

Об авторах

Щербинин Алексей Григорьевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского поли-

технического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

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

Ершов Сергей Викторович (Пермь, Россия) – студент кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

About the authors

Scherbinin Alexey Grigorevich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the chair Design and Technology in electrical engineering, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomol prospekt, 29, tel. +7 (342) 239-18-48, e-mail: ktei@pstu.ru).

Terlych Andrey Evgenevich (Perm, Russian Federation) – a senior teacher of the chair Design and Technology in electrical engineering, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomol prospekt, 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

Ershov Sergey Viktorovich (Perm, Russian Federation) – a student of the chair Designing and technology in electrical engineering, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomol prospekt, 29, e-mail: ktei@pstu.ru).

Получено 15.05.2012