

Влияние типа сомономера в составе ЛПЭНП на реологические свойства расплавов и механические показатели плоских пленок

The influence of the type of comonomer in the composition of LLDPE on the rheological properties of melts and mechanical properties of flat films

О.И. АБРАМУШКИНА¹, П.В. СУРИКОВ², Г.С. ЗЕРНОВ²

O.I. ABRAMUSHKINA¹, P.V. SURIKOV², G.S. ZERNOV²

¹ АО «Межотраслевой институт переработки пластмасс – НПО «Пластик», Москва, Россия

² МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М. В. Ломоносова), Москва, Россия

¹ Interindustry Institute of Plastics Processing – NPO "Plastic", JSC, Moscow, Russia

² MIREA – Russian Technological University (Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, Russia
abramushkina@mail.ru

Исследованы реологические и механические характеристики нескольких пленочных марок ЛПЭНП разного строения. Показано, что реологические характеристики изученных марок существенно различаются по величине эффективной вязкости и характеру течения их расплавов при воздействии сдвиговых нагрузок. Проведено сравнение характеристик пленок, изготовленных из изученных материалов при одинаковых условиях. Стойкость пленок к раздиру неоднозначно связана со структурой ЛПЭНП. Более высокие значения сопротивления раздиру имеют пленки из ЛПЭНП с бутеновым сомономером. Пленки из ЛПЭНП с бутеновым сомономером имеют более низкие значения прочности при разрыве, чем пленки из ЛПЭНП с гексеновым сомономером. Существенное влияние на свойства пленок оказывают процессы ориентации при их получении.

Ключевые слова: линейный полиэтилен низкой плотности, эффективная вязкость расплава, прочность при разрыве, сопротивление раздиру

The rheological and mechanical properties of several LLDPE film grades with different structures were studied. It was shown that the rheological properties of the studied grades differ significantly in terms of effective viscosity and melt flow patterns under shear loads. The properties of films produced from the studied materials under identical conditions were compared. Film tear resistance is ambiguously related to the LLDPE structure. Films made from butene-containing LLDPE exhibit higher tear resistance values. Films made from butene-containing LLDPE have lower tensile strength values than films made from hexene-containing LLDPE. Orientation processes during film production significantly affect the film properties.

Keywords: linear low-density polyethylene, effective viscosity, tensile strength, tear resistance

DOI: 10.35164/0554-2901-2026-02-8-12

Линейный полиэтилен низкой плотности применяют для производства многослойных пленок методами экструзии с раздувом рукава и плоскощелевой экструзии, которая позволяет получать пленки с несимметричной структурой, что важно для производства пленок со специальными свойствами. Отечественные предприятия выпускают пока небольшой ассортимент марок ЛПЭНП. Ассортимент марок зарубежных фирм более разнообразен.

Изучение реологических свойств образцов марок ЛПЭНП с близкими значениями показателя текучести расплава (ПТР) для производства пленочных изделий является актуальной задачей, поскольку ПТР определяют при стандартных условиях (низкая скорость и напряжение сдвига, одна температура) на стандартном капилляре, что не даёт информации о поведении полимера в каналах формующей оснастки.

Известно, что для стабилизации течения расплава через зазор плоскощелевых головок при производстве пленок весьма существенно отношение длины течения расплава к высоте зазора [1, 2], поэтому при исследовании использовали капилляр с $l/d = 20$. В таком капилляре релаксация высокоэластической деформации, накопленной при переходе расплава из широкого канала в узкий, происходит по длине капилляра, наблюдаемое разбухание расплава на выходе из формующего канала стабильно, невелико по величине, и коэффициент разбухания $K_p = 1,14-1,23$ в интервале температур от 200°C до 250°C [3].

Сравнение кривых течения для полимеров с близкими значениями ПТР важно с точки зрения поведения полимеров в реальных условиях переработки в различные изделия. Для ЛПЭНП это актуально еще и потому, что сополимер имеет линейное строение,

но, в зависимости от типа сомономера, разные по размеру и распределению вдоль цепи боковые заместители. Некоторые марки ЛПЭНП в определенном интервале скоростей сдвига проявляют характер течения, близкий к ньютоновскому, а затем переходящий в нестабильное течение при критических скоростях сдвига [2, 3]. На высокопроизводительных пленочных линиях с плоскощелевыми экструзионными головками при превышении критических скоростей течения расплава могут возникать поверхностные дефекты на полотне. Таким образом, важно иметь данные о поведении расплавов в интервалах скоростей сдвига и температур, отвечающих условиям технологического процесса и позволяющих моделировать эти процессы.

Целью данной работы являлось изучение и сравнение реологических показателей пленочных марок ЛПЭНП разного состава в условиях, моделирующих технологический процесс, а также их механических характеристик, определяющих поведение при эксплуатации.

Объектами исследования в работе были марки ЛПЭНП разных производителей, содержащие бутеновый (ЛПЭНП-Б), гексеновый (ЛПЭНП-Г) и октеновый (ЛПЭНП-О) сомомеры: LL09200 FE (ООО «Запсибнефтехим»), ЛПЭНП-Б), mLL10183 FE (ПАО «Казаньоргсинтез»), ЛПЭНП-Г), Lucene HP 1018BH (LG Chem, Южная Корея, ЛПЭНП-Г), InnoPlus LL7410A (PTT GC, Китай, ЛПЭНП-Б), Exceed m1020RA (Exxon Mobil, США, ЛПЭНП-Г), DOWLEX 6000G (Dow Chemical Company, США, ЛПЭНП-О), Sabic LLDPE 118NJ (Saudi Basic Industries Corporation, Саудовская Аравия, ЛПЭНП-Б).

Все марки применяются для производства пленок как методом раздува рукава, так и методом плоскощелевой экструзии, в том числе многослойных барьерных пленок.

В работе применяли следующие методы исследования: капиллярная вискозиметрия на микровискозиметре МВ-3 (ИНХС РАН им. Топчиева, РФ) с капилляром $l/d = 40/2$ в диапазоне температур от 200°C до 250°C. Для исключения влияния входных потерь на результаты измерений применяли набор капилляров диаметром 2 мм различной длины: 10, 20 и 30 мм.

Испытание пленок на растяжение по ГОСТ 14236-81 проводили на разрывной машине модели Р-5М (ПО «Точприбор», РФ) при скорости растяжения 500 мм/мин на образцах длиной 150 мм и шириной 10 мм.

Сопrotивление раздиру пленок определяли по ГОСТ 26128-84 на разрывной машине модели Р-5М при скорости растяжения 200 мм/мин на образцах типа 1.

Подготовку образцов для механических испытаний осуществляли по ГОСТ 14236-81.

Образцы пленок получали методом плоскощелевой экструзии на пластографе Брабендер, диаметр шнека 20 мм, $L/D = 25$, ширина щели плоскощелевой головки 230 мм, высота щели 1,0 мм. Режим получения образцов пленок: скорость вращения шнека 25 об/мин, температура по зонам экструдера, °C: I – 220, II – 240, III – 230.

Прием пленочного полотна осуществляли двумя тянущими вальцами с постоянной линейной скоростью вытяжки 0,75–0,8 м/мин. Толщина полученных пленок составляла от 90 до 110 мкм.

Паспортные характеристики указанных марок ЛПЭНП представлены в табл. 1.

Изученные марки ЛПЭНП имеют близкие значения ПТР, что ни в коей мере не говорит о близости вязкостных характеристик материалов в условиях их переработки. Состав материалов различен по типу сомономера и молекулярной массе, что вполне может сказаться на характере течения расплава полимера при его экструзии. От вязкостных характеристик полимера при его переработке зависят не только технологические параметры переработки, но и качество получаемой пленки. Известно, что марки ЛПЭНП имеют повышенную вязкость по сравнению с традиционно применяемым для производства пленочных изделий полиэтиленом низкой плотности ПЭНП [3]. Для сравнения в табл. 3 приведены реологические характеристики наиболее распространенной пленочной марки ПЭНП 15803-020 при одинаковых условиях измерения.

Пленки из ЛПЭНП с разными реологическими характеристиками могут отличаться механическими показателями, такими как прочность при растяжении и сопротивление раздиру, в силу формирования в них различной структуры. Указанные характеристики пленок определяют их потребительские свойства при эксплуатации.

Следует отметить, что сравнение в данной работе свойств пленок из ЛПЭНП отечественного и зарубежного производства, полученных в идентичных условиях, актуально, поскольку паспортные характеристики марок ЛПЭНП приводятся производителями для пленок не только разной толщины, но и полученных в различных условиях. При этом данные об условиях получения образцов пленок приведены не для всех марок. Поэтому сравнение характеристик пленок по паспортным данным не всегда корректно, в силу их разной надмолекулярной структуры, сформировавшейся в результате различной степени ориентации макромолекул в образцах материала при их получении.

Таблица 1. Паспортные характеристики марок ЛПЭНП.

Показатель	Марки ЛПЭНП						
	СИБУР LL09200 FE	DOWLEX 6000G	**Lucene mHP 1018BH	**СИБУР mLL10183 FE	InnoPlus LL7410A	**Exceed Flow m1020 RA	Sabic LLDPE 118NJ
Сомономер	бутен	октен	гексен	гексен	бутен	гексен	бутен
Плотность, г/см ³	0,920	0,916	0,918	0,920	0,918	0,920	0,918
ПТР, г/10 мин.	0,90	0,70	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Температура размягчения, °C	100	96	118	109	96	106	100
Характеристики пленок							
Толщина, мкм	38	50	25	15–20	25	25,4	50
Прочность при разрыве (MD*), МПа	44	36,7	52	46	28,0	50	30
Относительное удлинение при разрыве (MD*), %	800	570	550	535	790	510	850

*MD – вдоль направления экструзии

** mLL10183 FE, Exceed Flow m1020 RA и Lucene mHP 1018BH – сополимеры этилена с гексеном, полученные на металлоценовых катализаторах

Деформационно-прочностные показатели пленок при растяжении приведены вдоль направления экструзии (MD), поскольку в дальнейшем мы сравнивали показатели плоскощелевых пленок только в этом направлении.

Из данных табл. 1 видно, что технологические и физические показатели даны для гранулированных материалов. Механические характеристики приведены для пленок разной толщины.

Для ряда марок имеются ограниченные данные об условиях получения пленочных образцов на опытных установках [4–9]. Так, пленка толщиной 25,4 мкм из Exceed Flow m1020 RA фирмы ExxonMobil (США) (ЛПЭНП-Г) изготовлена на опытной установке раздува рукава при температуре расплава по зонам экструдера от 193°C до 204°C, с коэффициентом раздува 2,5, высотой щелевого зазора 0,76 мм и производительностью 1,79 кг/час/см (на 1 см окружности фильеры) [4].

Характеристики марки mLucene HP 1018BH фирмы LG Chem (Южная Корея) (ЛПЭНП-Г) приведены для пленки толщиной 25 мкм. Даны рекомендации для переработки материала этой марки в пленку: температура экструзии по зонам от 150°C до 180°C, степень раздува 1,5–3,0 [5].

Пленка из ЛПЭНП-Б марки InnoPlus LL7410A фирмы PTT Global Chemical Public Company (Китай) получена при коэффициенте раздува 2,5. Больше никаких условий не приведено [6].

Пленка из ЛПЭНП-Б Sabic LLDPE 118NJ толщиной 50 мкм изготовлена при коэффициенте раздува 2, диаметре головки 200 мм, высоте зазора 2,7 мм и производительности установки Kiefel IBC 140 кг/час [7].

Пленка из ЛПЭНП-О марки DOWLEX 6000G фирмы DOW Chemical Corp. (США) получена толщиной 50 мкм [8]. Условия получения не представлены.

Для отечественных марок компании СИБУР LL09200 FE и mLL10183 FE условия получения испытываемой пленки не приводятся [9, 10].

Отсюда можно предположить, что характеристики пленок, полученных в разных условиях, могут различаться в силу формирования разной надмолекулярной структуры.

Одной из задач работы было сравнение свойств пленок, полученных методом плоскощелевой экструзии в идентичных условиях: пленки изготавливали при постоянной высоте щелевого зазора экструзионной головки и близких скоростях отвода пленок.

В настоящее время отечественная промышленность производит марки ЛПЭНП различного состава. Данные о характеристиках пленок из этих марок, полученных в идентичных условиях, позволяют оценить их характеристики в сравнении с зарубежными образцами.

Расплавы полимеров в вязкотекучем состоянии являются вязкоупругими жидкостями, способными накапливать высокоэластическую деформацию в процессе течения через узкие каналы. Одной из характеристик высокоэластической деформации являются входные потери давления.

На рис. 1 приведены кривые течения для образца марки LL09200 FE (ЛПЭНП-Б), полученные при температуре 210°C и рассчитанные без учета входовой поправки.

Как видно из рис. 1, результаты измерений на капилляре длиной 10 мм (кривая 1) демонстрируют наличие существенного вклада

входных потерь в общий перепад давления. В то же время для капилляров длиной 20 и 30 мм (кривые 2 и 3) величина перепада давления находится в пределах погрешности измерений, т.е. кривые течения практически совпадают. Аналогичная картина зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига, полученная для трех капилляров, наблюдалась и для других марок ЛПЭНП.

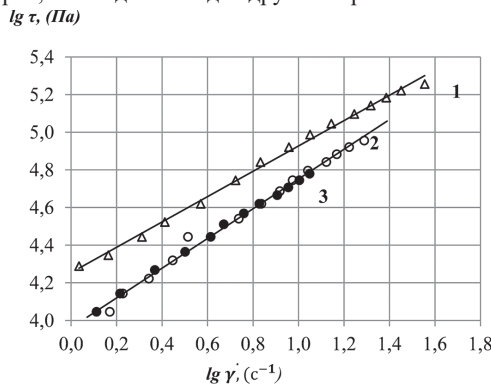


Рис. 1. Кривые течения для ЛПЭНП-Б марки LL09200 FE при 210°C для капилляров диаметром 2 мм и длиной: 1 – 10 мм, 2 – 20 мм и 3 – 30 мм.

В табл. 2 приведены значения давлений на капиллярах и входных потерь для трех марок ЛПЭНП при температуре испытания 210°C и двух значениях скорости сдвига.

Таблица 2. Расчетные значения входных потерь (ΔP) при измерении давления на капиллярах ($P_{\text{общ}}$) диаметром 2 мм и длиной 20 и 30 мм при 210°C.

Марка материала	Вид сомономера	Скорость сдвига 1 с ⁻¹		Скорость сдвига 10 с ⁻¹	
		Давление, $P_{\text{общ}}$, МПа	ΔP , МПа ($\Delta P/P_{\text{общ}}$, %)	Давление $P_{\text{общ}}$, МПа	ΔP , МПа ($\Delta P/P_{\text{общ}}$, %)
LL 09200FE	бутен	0,39	0,03 (7,7)	2,84	0,14 (4,9)
Lucene HP 1018BH	гексен	0,32	0,02 (6,3)	2,80	0,22 (7,9)
Dowlex 6000G	октен	0,59	0,02 (3,4)	3,16	0,12 (3,8)

Таким образом, небольшая величина входных потерь (не более 10% от общего перепада давления по длине капилляра) для исследованных марок ЛПЭНП позволила не вносить соответствующую поправку на входные потери при расчете напряжения сдвига на стенке канала капилляра. Напряжение сдвига рассчитывали по

Таблица 3. Реологические характеристики марок ЛПЭНП и ПЭНП.

Марка материала, ПТР, г/10 мин	Вид сомономера	Индекс течения, n , при 200–250 °C	Реологические характеристики расплавов		
			Эффективная вязкость, $\eta_{\text{эф}}$ (при $\dot{\gamma} = 10 \text{ с}^{-1}$), Па·с		**Энергия активации вязкого течения, $E_{\text{акт}}$, кДж/моль
			200°C	250°C	
ЛПЭНП					
LL09200 FE, 0,9 г/10 мин	бутен	0,83–0,79	3070	1740	23,6
InnoPlus LL7412A 1,0 г/10 мин	бутен	0,80–0,74	3550	2190	27,1
SABIC 118 NJ 1,0 г/10 мин	бутен	0,85–0,82	4220	1820	23,2
mLL10183 FE 1,0 г/10 мин	гексен	0,98–0,93	5300	2800	29,3
mLucene HP 1018BH 1,0 г/10 мин	гексен	0,91–0,89	3480	1790	27,4
*Exceed m1020RA 1,0 г/10 мин	гексен	0,65–0,64	2880	1740	27,1
DOWLEX 6000 G 0,7 г/10 мин	октен	0,83–0,80	3910	2090	25,5
ПЭНП					
ПВД 158030–020 2,0 г/10 мин	–	0,62–0,58	2110	940	36,5

* в составе материала имеются фторсодержащие соединения;

** средняя расчетная энергия активации вязкого течения, определенная в изученном диапазоне скоростей сдвига и температур.

формуле [11], где P – давление, l/d – отношение длины к диаметру капилляра.

На рис. 2 представлены кривые течения для двух марок ЛПЭНП.

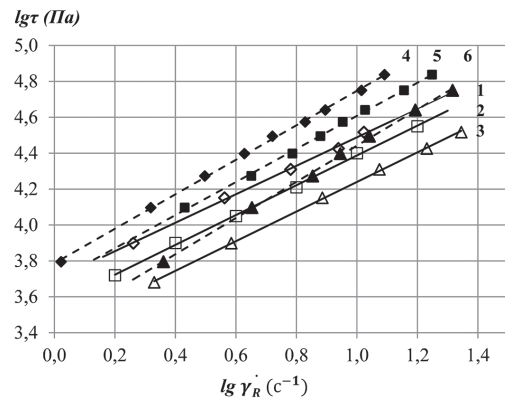


Рис. 2. Кривые течения для ЛПЭНП-Б марки LL09200 FE (кривые 1–3 сплошные линии) и ЛПЭНП-Г mLL10183 FE (кривые 4–6 пунктирные линии) при температурах 200°C (1, 4), 220°C (2, 5) и 250°C (3, 6).

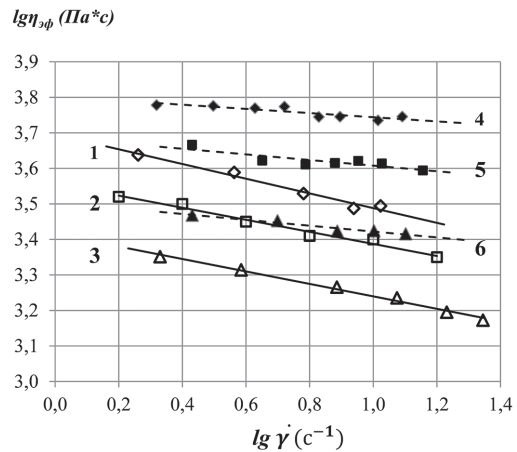


Рис. 3. Кривые вязкости ЛПЭНП-Б марки LL09200 FE (линии 1–3 сплошные) и ЛПЭНП-Г марки mLL10183 FE (линии 4–6 пунктирные) при температуре 200°C (1, 4), 220°C (2, 5) и 250°C (3, 6).

На представленной зависимости видна разница в наклоне кривых: для ЛПЭНП-Б наклон кривых меньше, чем для ЛПЭНП-Г. Это говорит о различиях в характере течения: для ЛПЭНП-Г, полученного на металлоценовых катализаторах, индекс течения близок к единице ($n = 0,98 - 0,93$), расплав течет как ньютоновская жидкость,

что, вероятно, связано с линейным строением и более узким его молекулярно-массовым распределением [12].

Более наглядно сравнивать зависимость «эффективная вязкость – скорость сдвига» (кривая вязкости), зависящую от числа оборотов шнека и, соответственно, производительности пленочной установки. Кривые вязкости представлены на рис. 3.

Представленные на рис. 3 кривые вязкости показывают, что в диапазоне скоростей сдвига от 0 до 30 с⁻¹ вязкость расплава ЛПЭНП-Г марки mLL10183 FE выше, чем у марки LL09200 FE (ЛПЭНП-Б), и снижается в меньшей степени при увеличении скорости сдвига. Кроме того, ЛПЭНП-Г демонстрирует повышенную вязкость по сравнению с маркой ЛПЭНП-Б. Это может вызывать дополнительные трудности при переработке.

Анализ полученных реологических данных для пленочных марок ЛПЭНП отечественного и зарубежного производства представлен в табл. 3. Для сравнения реологического поведения расплавов приведены характеристики ПВД марки 158030-020 (ОАО «Уфаоргсинтез»).

Характерно, что для ЛПЭНП-Г марок mLL10183 FE и mLucene HP 1018BH в исследованном интервале скоростей сдвига в зависимости от температуры индексы течения составляют 0,98–0,93 и 0,91–0,89 соответственно, т.е. характер течения полимера близок к ньютоновскому. Для ЛПЭНП-Б значения индексов течения лежат в диапазоне 0,85–0,74, что значительно ниже, чем для марок ЛПЭНП-Г.

Следует отметить существенное различие величины эффективной вязкости расплавов отечественных марок ЛПЭНП в диапазоне температур 200–250 °С: вязкость ЛПЭНП-Г mLL10183 FE в 1,6–1,7 раза выше, чем у ЛПЭНП-Б LL09200 FE. При этом ПТР полимеров очень близки. Вероятно, при определении ПТР на стандартном капилляре ($d = 2$ мм, $l = 8$ мм) характер течения расплава существенно отличается от течения полимера в длинном капилляре.

Наличие фторсодержащих соединений в составе марки Exceed m1020RA приводит к сближению индекса течения марки Exceed m1020RA (ЛПЭНП-Г) с индексом течения ПЭВД, для которого снижение эффективной вязкости при увеличении скорости сдвига существенно. Производственники отмечают лучшую технологичность этой марки ЛПЭНП.

Переработка линейных полиэтиленов в пленки проводится при режимах, реализующих достаточно высокие скорости сдвига в расплаве на выходе из экструзионной головки. Поэтому снижение вязкостных характеристик при высоких скоростях сдвига положительно влияет на производительность и качество пленок. Чем выше вязкость полимера и меньше влияние на нее скоростных параметров пленочной линии, тем сложнее перерабатывать материал из-за сужения технологического окна переработки, а при одинаковых условиях переработки (в большей степени для высоковязких расплавов с узким ММР) создаются условия для ориентационных процессов, что в конечном счете оказывает положительное влияние на прочностные характеристики пленок при растяжении. Что

касается сопротивления пленок раздиру, то, по аналогии с пленками из ПЭВП, высокая ориентация вдоль направления экструзии приводит к упрочнению пленок в продольном направлении и ослаблению в поперечном.

Результаты испытания образцов пленок при одноосном растяжении в продольном направлении представлены в табл. 4.

Из данных табл. 4 следует, что отклонение показателей прочности при разрыве пленок из образцов изученных ЛПЭНП от паспортных значений для пленок, полученных методом раздува, у большинства изученных полимеров не превышает 10%. Исключение составляют пленки из LL09200 FE и DOWLEX 6000G, для них отклонение 33 % и 27 % соответственно. Это подтверждает ранее приведенные данные о существенном влиянии технологии получения на свойства пленок из ЛПЭНП [13].

Характер кривых растяжения образцов пленок из ЛПЭНП с бутеновым и гексеновым сомономерами даёт информацию о процессах, происходящих при растяжении образцов. Часть образцов визуально становилась непрозрачной, что свидетельствовало о процессе кристаллизации при ориентации пленок, что приводило к повышению механических характеристик.

На рис. 4 представлены характерные кривые растяжения на примере отечественных марок ЛПЭНП-Б и ЛПЭНП-Г.

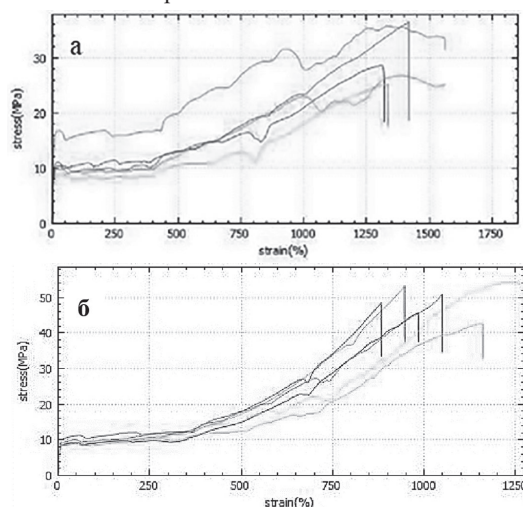


Рис. 4. Типичные кривые «напряжение–удлинение» для пленок из ЛПЭНП-Б LL09200 FE (а) и ЛПЭНП-Г mLL10183 FE 09200 (б).

Приведенные рисунки демонстрируют различие в характере растяжения образцов ЛПЭНП с разными сомономерами: ЛПЭНП-Г способен к высоким деформациям с резким ростом напряжения (после достижения деформации порядка 500% в процессе растяжения), по сравнению с постепенным для ЛПЭНП-Б, что, очевидно, является следствием существенной ориентации макроцепей в направлении растяжения и упрочнения образца. При этом толщина

Таблица 4. Характеристики пленок из ЛПЭНП при растяжении.

Показатель	Метод испытания ГОСТ	Марки ЛПЭНП					
		LL09200 FE	InnoPlus LL7410A	mLL10183 FE	mLucene HP 018BH	Exceed Flow m1020 RA	DOWLEX 6000G
Сомономер	-	бутен	бутен	гексен	гексен	гексен	октен
Толщина, мкм	17035–86	110	100	90	100	90	90
Прочность при разрыве, МПа*/S**	14236–81	29,6/5,8	30,8/1,9	47,8/4,3	47,5/7,3	46,2/7,6	50,6/2,8
Отклонение от паспортных значений, %	-	33	10	4	9	8	27
Относительное удлинение при разрыве, % *	14236–81	1070	1230	1040	980	930	970

* показатели для опытных образцов измеряли в направлении экструзии

** доверительный интервал с надежностью 0,95

Таблица 5. Результаты испытания пленок из ЛПЭНП на сопротивление раздиру.

Показатель	Метод испытания	Марки ЛПЭНП					
		LL09200 FE	InnoPlus LL7410A	mLL10183 FE	mLucene HP 1018BH	Exceed Flow m1020 RA	DOWLEX 6000G
Сомономер	-	бутен	бутен	гексен	гексен	гексен	октен
Средняя толщина, мкм	ГОСТ 17035–86	110	100	90	100	90	90
Сопротивление раздиру, Н/мм	ГОСТ 26128–84	204,6	184,7	103,0	82,2	99,7	135,9
Доверительный интервал, S		23,7	15,3	12,0	12,1	34,7	24,0

образца пленки уменьшается, и он белеет, что связано с кристаллизацией полимера при ориентации.

Сравнение полученных показателей с паспортными данными показывает относительно близкие значения прочности при разрыве и более высокие показатели относительного удлинения при растяжении экспериментальных образцов. Последнее обстоятельство объясняется, вероятно, тем, что относительное удлинение при разрыве в наших экспериментах оценивали по расстоянию между зажимами разрывной машины. По паспортным данным (и в сравнении с некоторыми нашими результатами) удлинение, определенное с использованием экстензомера, существенно ниже из-за измерения непосредственно длины рабочего участка образца.

Одной из важных потребительских характеристик пленочных материалов является сопротивление раздиру, например, при использовании пленок в качестве вкладышей тканых баулов, в качестве пищевых пакетов, т.е. в изделиях, которые могут подвергаться в процессе изготовления, транспортировки и эксплуатации образованию дефектов в виде царапин.

Испытания пленок на стойкость к раздиру показали различную величину этого показателя, обусловленную структурой линейного полиэтилена. Результаты представлены в табл. 5.

На рис. 5 показана схема испытания пленок на сопротивление раздиру по ГОСТ 26128–84.

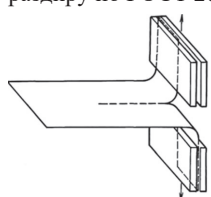


Рис. 5. Схема испытания пленок на сопротивление раздиру.

На рис. 6 представлены типичные кривые «нагрузка–деформация» при испытании пленок на сопротивление раздиру.

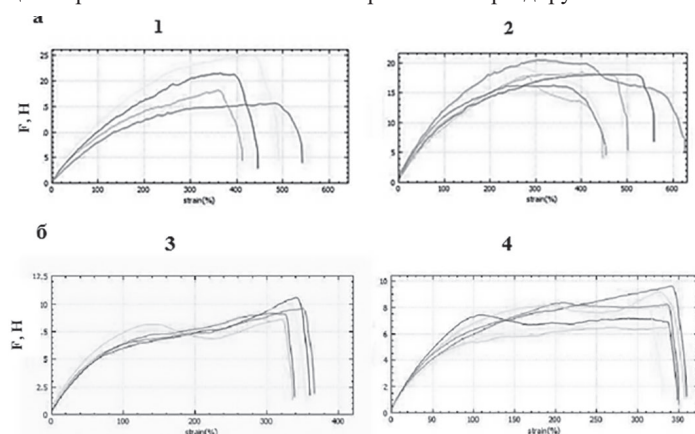


Рис. 6. Кривые растяжения пленок в условиях раздира: а – из марок ЛПЭНП-Б LL09200 FE (1), InnoPlus LL7410A (2); б – из марок ЛПЭНП-Г mLL10183 FE (3) и mLucene HP 1018BH (4).

Из данных рис. 6 видно, что характер деформации пленок из марок ЛПЭНП-Б при раздире несколько отличается от таковой для пленок из марок ЛПЭНП-Г. Если для первых в процессе раздира наблюдается плавное нарастание нагрузки по мере деформирования образца, то вторые проявляют некоторую способность к дополнительной ориентации. Однако, несмотря на это обстоятельство, пленки из марок ЛПЭНП-Б имеют более высокую стойкость к раздиру, примерно в 1,5–2 раза.

Более высокая стойкость к раздиру пленок из марок ЛПЭНП-Б, вероятно, связана со структурными характеристиками и меньшей способностью к ориентации по сравнению с марками ЛПЭНП-Г. В работах [14, 15] авторами изучено влияние состава ЛПЭНП и длинноцепочечных ответвлений на сопротивление раздиру. Авторами показано, что разница в стойкости пленок к раздиру связана с различной степенью ориентации макромолекул полимера даже при одинаковых условиях получения пленок. Кроме того, в работе показан дисбаланс прочности при растяжении и сопротивления

пленок на раздир в зависимости от наличия длинноцепочечных ответвлений [14]. Сравнение стойкости к раздиру пленок из ЛПЭНП с бутеновым, гексеновым и октеновым сомономерами разной молекулярной массы и ПТР изучено в [15]. Авторами показано, что образцы плоских пленок из сырья с ПТР 1,1 г/10 мин имеют повышенную стойкость к раздиру для марок ЛПЭНП-О и ЛПЭНП-Б.

Таким образом, в исследовании установлено, что марки ЛПЭНП-Б и ЛПЭНП-Г различаются по величине эффективной вязкости в диапазоне скоростей сдвига, реализуемых на опытной установке. При этом полученные в идентичных условиях пленки из марок ЛПЭНП-Г имеют более высокие значения прочности при разрыве, но более низкие показатели сопротивления раздиру, чем пленки из ЛПЭНП-Б. Эти два показателя определяют потребительские свойства пленочных материалов, а также возможность снижения или повышения материалоемкости изделий из полимерных пленок в зависимости от эксплуатационных условий.

Литература

- Шерышев М.А. Производство изделий из полимерных пленок. СПб.: НОТ. 2011. 556 с. ISBN: 978-5-91703-020-3.
- Film extrusion and conversion: technical guide. [Electronic resource] // ALKAMAX.com URL: <https://alkamax.com.au/wp-content/uploads/2017/12/tg3film.pdf>. (Дата обращения: 21.08.2025).
- Абрамушкина О.И., Батухин Г.А. Особенности экструзии пленок из смесей ПЭНП и ЛПЭНП современных марок // Пластические массы. 2024. №1. С. 6–10. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2024-01-6-10>.
- [Electronic resource] URL: exxonmobilchemical.com/en/chemicals/web. (Дата обращения 16.02.2026).
- [Electronic resource] URL: <https://ucgrus.com/upload/k/7da/7da29561899013015676b1b6eefb7e9.pdf> (Дата обращения 16.02.2026).
- [Electronic resource] URL: https://russianpolymer.com/pdf/DtXIfU_InnoPlus-LL7410A.pdf (Дата обращения 16.02.2026).
- [Electronic resource] URL: https://b2bpolymer.com/TDS/SAB-IC_118NJ.pdf (Дата обращения 16.02.2026).
- [Electronic resource] URL: https://russianpolymer.com/pdf/4B-VdaL_DOWLEX6000G.pdf (Дата обращения 16.02.2026).
- Сибур. Техническая информация о продукте LL09200 FE. [Electronic resource] URL: https://mirpolimerov.com/f/tds_ll09200_fe_rus.pdf (Дата обращения 16.02.2026).
- Техническая информация о продукте mLL10183 FE. [Electronic resource] URL: <https://catalog.sibur.ru/upload/iblock/d74/25isyg-3nbczf47f18jbbz9b17xrlt3qp/TDS-mLL10183-FE-RUS.pdf> (Дата обращения 16.02.2026).
- Шах В. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения. /Пер. с англ. под ред. Малкина А.Я. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – 732 с., с. 239. ISBN: 978-5-91703-005-0.
- Dennis B. Malpass. Introduction to Industrial Polyethylene Properties, Catalysts, Processes. Wiley-Scrivener, 2010, 156 p., ISBN 10:0470625988. ISBN13: 9780470625989
- S.A. Furquan. Effect of blend ratio of h-LLDPE with LDPE on the processability and the mechanical properties of blown films // International Polymer Processing. 2012. 27 (3). P. 392–398. DOI:10.3139/217.2575.
- Paula Cristina Dartora, Ruth Marlene Campomanes Santana, Ana Cristina Fontes Moreir. The influence of long chain branches of LLDPE on processability and physical properties. // Material Science, Polyethylene, Science and Technology in the Field of Polymers 2015, Polymers. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.1732>.
- McNally G.M. The Effect of Polymer Properties on the Mechanical Behavior and Morphological Characteristics of Cast Polyethylene Film for Stretch and Cling Film Applications // Journal of Plastic Film & Sheeting. 2005, 21(1). P. 39–54. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/8756087905052804>.