

*А.В. БЕСПРОЗВАННЫХ*, д-р. техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»  
*И.А. МОРОЗОВ*, ОАО «Одескабель» (Одесса)

### ПОВЕРХНОСТНЫЕ ДЕФЕКТЫ И СПОСОБЫ ИХ УСТРАНЕНИЯ ПРИ ЭКСТРУДИРОВАНИИ ПОЛИМЕРНЫХ ОБОЛОЧЕК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

Розглянута принципова схема роботи одночервячних екструдерів, які застосовуються при виробництві кабелів і дрітків. Встановлені причини виникнення поверхневих дефектів оболонок кабелів при високих швидкостях накладення полімерів і засоби їх усунення.

The basic circuit of work screw of extruders, cables used in manufacture and wires is considered. The reasons of occurrence of superficial defects of environments of cables are established at high speeds extruding polymers and ways of elimination of defects.

**Введение.** Технология наложения полимерных оболочек и защитных шлангов волоконно-оптических кабелей имеет ряд отличительных особенностей. Это связано с особенностью применяемого основного конструктивного элемента кабеля - оптического волокна. Важно не допустить теплового удара и механических деформаций волокна в технологическом процессе. Для этого наложение оболочки на сердечник кабеля осуществляют с воздушным зазором на экструзионных линиях с диаметром шнека свыше 45 мм. Экструдеры имеют бесступенчатый привод, позволяющий плавно изменять частоту вращения шнека 3 с точностью  $\pm 3\%$  от заданной величины. Обогрев цилиндра и головки - электрический с бесступенчатой регулировкой температуры. Интервал установки заданной температуры составляет  $1^\circ\text{C}$ . Радиальная толщина оболочек - от 0,5 до 3,0 мм. Допуск по наружному диаметру составляет  $\pm 0,05\text{ мм} = 50\text{ мкм}$ . Линейная скорость нанесения оболочек от 3 до 60 м/мин. Причем наблюдается тенденция значительного увеличения линейных скоростей экструдирования до 300 м/мин. При линейных скоростях 50 - 100 м/мин для кабелей диаметром 2 - 10 мм начинают проявляться явления «эластической турбулентности» расплава полимера. Они приводят к появлению на поверхности экструдированной оболочки выраженных дефектов, обусловленных увеличением сечения струи по сравнению с технологическим инструментом в кольцевом зазоре [1 - 2].

**Цель статьи** - анализ причин возникновения поверхностных дефектов при экструдировании полимерных оболочек кабелей и способы их устранения.

**Экструзия термопластичных полимеров.** Наложение оболочек осуществляется на червячных прессах путем выдавливания расплава полимера, находящегося в вязкотекучем состоянии. Этот способ обеспечивает высокую производительность, непрерывность процесса,

дающую возможность выпускать продукцию большими длинами. Наибольшее распространение для переработки полимеров получили одночервячные (одношнековые) экструдеры. Современный экструдер - это машина, обеспечивающая одновременно нагрев полимера за счет работы сил внутреннего трения и гомогенизацию вследствие больших деформаций сдвига, а также создающая гидростатическое давление, необходимое для непрерывного продавливания материала через профилирующий инструмент. Поэтому можно определить современный экструдер, как совершенно свободный от пульсации давления насос, подающий термически однородный расплав с постоянной производительностью и при постоянном давлении

Экструдер (рис.1) состоит из червяка 3, вращающегося внутри цилиндрического корпуса 5. Внутри корпуса запрессовывается гильза с азотированной, закаленной и термообработанной поверхностью. Обогрев корпуса осуществляется нагревателями 6, сгруппированными в несколько, как правило, в четыре, тепловых зон. На конце корпуса устанавливается головка с профилирующим технологическим инструментом 9, соединяющаяся с корпусом экструдера посредством адаптера. Между шнеком и адаптером располагается решетка 14 с пакетом фильтрующих сеток. Корпус устанавливается на станине. Осевое усилие воспринимается блоком упорных подшипников 20, 21. Привод шнека осуществляется от регулируемого электродвигателя посредством редуктора 18 [2].

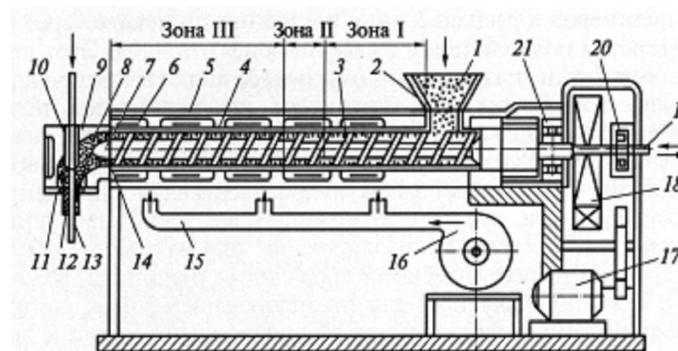


Рис. 1 - Схема одночервячного экструдера: 1- перерабатываемый полимер; 2 - загрузочная воронка экструдера; 3 - червяк; 4 - втулка; 5 - рабочий цилиндр; 6 - нагреватель; 7 - насадка червяка; 8 - расплав полимера; 9 - головка экструдера; 10 - дорн; 11 - матрица; 12 - экструдированный слой; 13 - элемент конструкции, на который наносится слой полимера; 14 - решетка; 15 - внешнее охлаждение цилиндра; 16 - вентилятор; 17 - электродвигатель; 18 - редуктор; 19 - охлаждающая ванна; 20, 21 - подшипники

Основной рабочий узел экструдера - шнек (3). Он забирает непластифицированный материал от загрузочного отверстия, разогревая и уплотняя его, равномерно подает в виде гомогенного расплава к головке, продвигая по каналам червяка. В свою очередь материал разогревается как за счет тепла, выделяющегося вследствие вязкого трения, так и тепла, подводимого от расположенных на корпусе нагревателей. Вследствие уплотнения, из материала удаляется захваченный вместе с гранулами воздух, и удельный объем композиции уменьшается. Для компенсации уменьшения удельного объема композиции канал червяка выполняют с уменьшающимся объемом витка. Глубина канала червяка на выходе всегда меньше, чем на входе. Сжатие (компрессия) необходима также для более равномерного прогрева расплава.

По характеру процессов, протекающих на каждом участке шнека, его обычно можно разделить на три основные зоны (таблица 1):

**I - загрузочная зона** – участок, в котором перерабатываемый материал находится в твердом состоянии;

**II - зона сжатия** – участок, в котором происходит расплавление материала;

**III - дозирующая зона** – участок, в котором материал находится в вязкотекучем состоянии.

Таблица 1 - Температурные режимы переработки кабельных композиций на основе полиэтилена и ПВХ пластика

Материал экструдированного полимера	Температура нагрева, °С				
	Зона цилиндра			Головка экструдера	Матрица
	I	II	III		
Полиэтилен низкой плотности: -при радиальной толщине покрытия меньше 0,8 мм - при радиальной толщине покрытия больше 0,8 мм	130 – 150	160 – 180	180 - 210	200 – 230	220 - 240
	160 - 180	160 - 180	170 - 190	180 - 200	190 - 200
Полиэтилен высокой плотности	200 - 220	230 - 250	240 – 260	250 – 270	260 - 280
ПВХ пластикат	135	145 - 150	150 - 165	165	175

**Загрузочная зона.** В загрузочную зону гранулированный материал (полимер) попадает обычно при комнатной температуре. Заполнив канал, материал пере-

мещается подобно твердому стержню. По мере продвижения вдоль канала стержень уплотняется и, вследствие существования сил трения, препятствующих его движению, подвергается объемному сжатию. Скорость перемещения пробки гранул в канале шнека зависит от соотношения между коэффициентами трения между гранулами и поверхностями шнека и корпуса. Так, чем меньше коэффициент трения между шнеком и полимером, тем быстрее материал движется по каналу. И наоборот, чем больше коэффициент трения между поверхностью корпуса и полимером, тем выше скорость передвижения полимера. Для уменьшения коэффициента трения поверхность винтового канала тщательно шлифуют и полируют. На внутренней поверхности корпуса делают неглубокие полуцилиндрические продольные пазы.

Особенно большое значение имеет температурный режим переработки полимеров в загрузочной зоне. При температуре 80 – 90 °С коэффициент трения термопластов выше, чем при комнатной температуре, в то время как дальнейшее повышение температуры сопровождается его постепенным уменьшением. Поэтому обычно выбирают температурный режим таким, чтобы температура внутренней стенки корпуса в загрузочной зоне лежала в пределах 80 – 100 °С.

**Зона сжатия.** В зоне плавления материал переходит из твердого состояния в расплавленное под воздействием тепла, подводимого от стенок корпуса, и тепла, выделяющегося в результате деформации материала. Твердая пробка гранул, двигаясь по винтовому каналу шнека, попадает в участок корпуса, в пределах которого температура внутренней поверхности корпуса выше температуры плавления материала. Контактующая со стенкой поверхности пробка начинает плавиться, и на внутренней стенке корпуса образуется тонкая пленка расплава. В тот момент, когда толщина этой пленки оказывается больше, чем величина радиального зазора между гребнем нарезки шнека и стенкой корпуса, толкающая стенка канала начинает соскребать слой расплава с внутренней стенки корпуса и собирать его в области, непосредственно примыкающей к передней грани толкающей стенки. По мере продвижения пробки гранул ширина области, заполненной расплавом, постепенно увеличивается, а ширина твердой пробки уменьшается. Процесс плавления заканчивается в тот момент, когда пробка совершенно исчезает. Очевидным следствием такого механизма плавления является зависимость зоны сжатия от основных параметров технологического режима: производительности и заданного распределения температур.

**Зона дозирования.** После окончания плавления винтовой канал шнека оказывается заполненным расплавом полимера [5]. Начиная с этого момента, движение расплава в канале шнека становится подобно движению вязкой жидкости в канале винтового насоса. Фактическое движение расплава в зоне дозирования осуществляется по винтовой траектории (рис.2) [4]. Это движение принято представлять как сумму двух независимых движений.

Первое – поступательное течение, - представляет собой движение расплава вдоль оси винтового канала. Объемный расход этого движения определяет, в конечном счете, объемную производительность экструдера, и, следовательно, ограничивает скорость передвижения пробки гранул в пределах зон питания и плавления.

Второе – циркуляционное течение,- представляет собой круговое движение расплава в направлении, перпендикулярном оси винтового канала. Двигаясь поперек канала, поток встречает стенку канала и поворачивает в обратную сторону. Существование циркуляционного течения обеспечивает гомогенизацию расплава, выравнивает распределение температур и позволяет использовать, при необходимости, экструдер как смеситель.

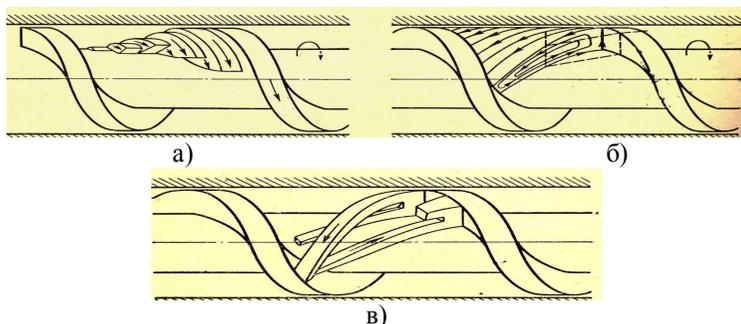


Рис. 2 Схема движения расплава в дозирующей зоне червяка: а – поступательное течение; б – циркуляционное; в – итоговое винтовое движение

Часть материала, подходящего к стенке, не поворачивает обратно, а проходит через кольцевой зазор, существующий между гребнем и стенкой винтового канала и поверхностью корпуса. Это – поток утечки. Производительность дозирующей зоны равна разности между объемным расходом вынужденного потока и расходом утечки.

В начале зоны дозирования температура расплава практически равна температуре плавления. Продвигаясь в зоне дозирования, полимер продолжает разогреваться до температуры экструзии. При этом разогрев происходит как за счет подвода извне, так и за счет тепла, выделяющегося вследствие интенсивной деформации сдвига. Одновременно идет процесс гомогенизации расплава. Происходит окончательное расплавление мелких нерасплавившихся в зоне сжатия включений и выравнивания температурного поля.

Объемный расход материала в любой зоне шнека постоянен. Поскольку для нормальной работы экструдера необходимо, чтобы расплав, поступающий к рабочему инструменту (головке), имел заданную однородную по сечению температуру, время пребывания расплава в зоне

дозирования должно быть достаточным для его прогрева и гомогенизации. Подготовленная масса полимера поступает непосредственно к кольцевому зазору, образованному технологическим инструментом – дорном (10) и матрицей (11).

#### Поверхностные дефекты оболочки и способы их устранения.

Типичной особенностью истечения расплава при высокой скорости экструдирования из зазоров, образованных технологическим инструментом, является увеличение сечения струи по сравнению с технологическим инструментом. Такое явление получило название эластическое восстановление струи

(рис. 3). Увеличение скорости сдвига сопровождается не только ростом величины

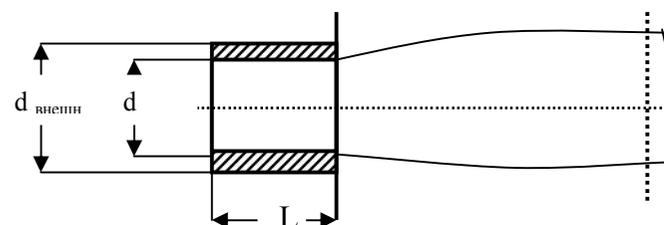


Рис. 3 - Схема развития высокоэластического восстановления после истечения расплава из кольцевого зазора

эластического восстановления. Начиная с определенного значения скорости сдвига, которое называется критическим, струя экструдированного полимера теряет правильную цилиндрическую форму. На ее поверхности появляются вмятины и утолщения. Изменение поверхности полимера, вытекающего из кольцевого зазора технологического инструмента, связывают с началом неустойчивого течения. Для описания этого эффекта в литературе используют различные термины: применительно к слабо выраженным дефектом - «матовость», «акуля кожа», «апельсиновая кожура»; применительно к периодическим дефектам – «поверхность бамбука», «винт»; для очень сильных искажений струи – «разрушение» или «дробление поверхности» расплава. В целом, это явление «эластической турбулентностью» или «неустойчивое течение». Оно может проявляться с различной интенсивностью. **Первая** степень интенсивности характеризуется появлением матовой поверхности, вызванной возникновением микрошероховатостей. **Вторая** – мелкие периодические искажения типа винтовой линии или «елочки», образующиеся на поверхности струи. **Третья** – крупномасштаб-

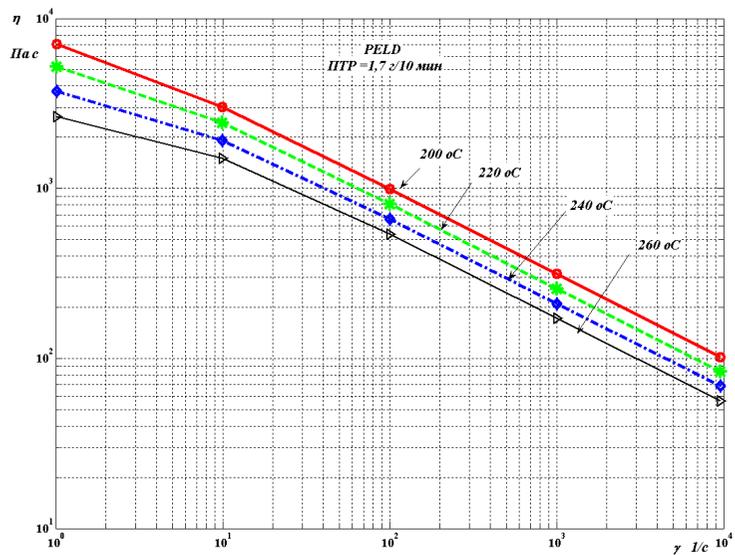


Рис.4 - Влияние скорости сдвига на эффективную вязкость расплава ПЭНП.  
ПТР 1,7 г / 10мин

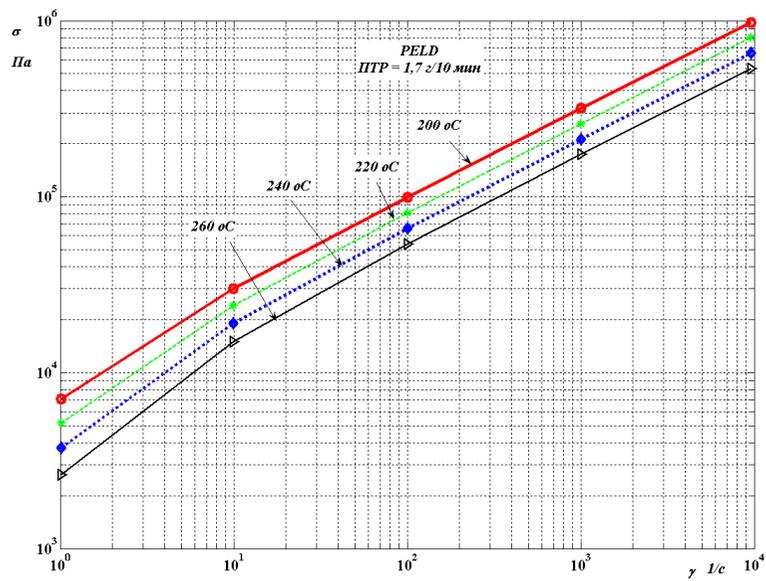


Рис.5 - Влияние скорости сдвига на напряжение сдвига расплава ПЭНП  
ПТР 1,7 г / 10 мин

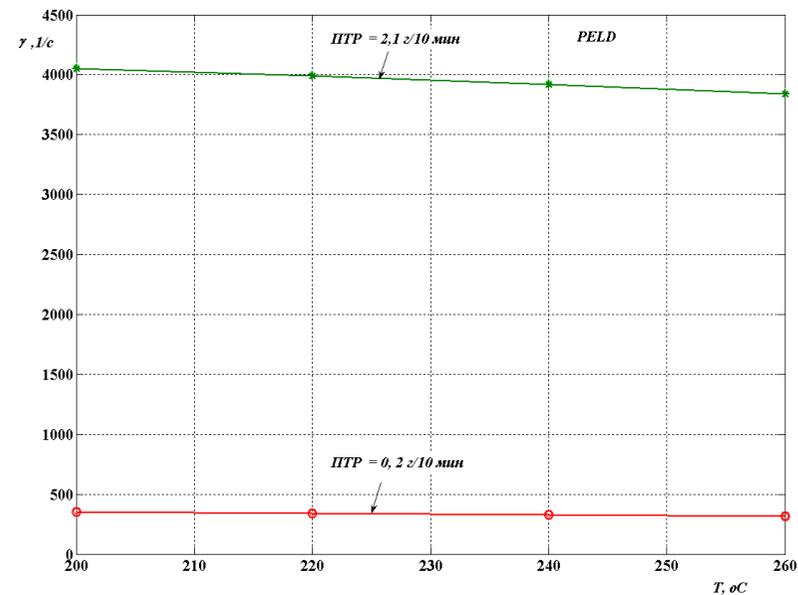


Рис.6- Влияние температуры в кольцевом зазоре на скорость сдвига на внутренней поверхности зазора

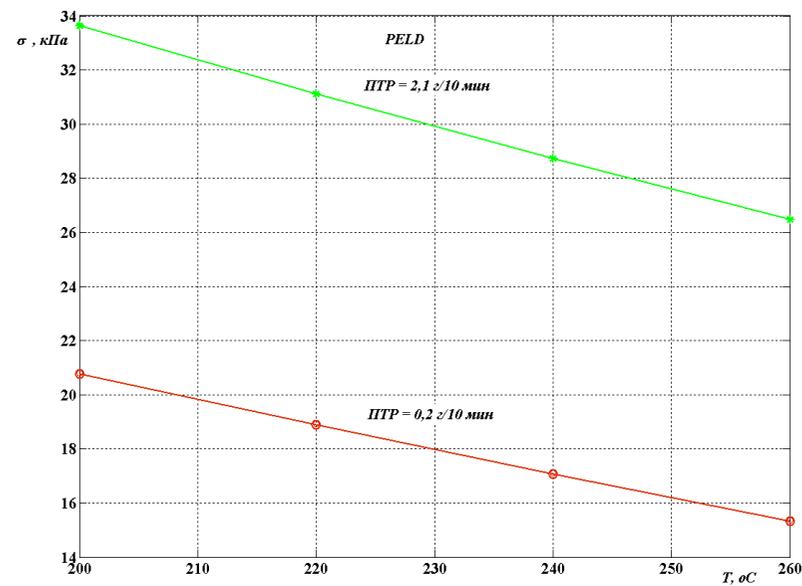


Рис.7 - То же, что и на рис.6, только для напряжения сдвига

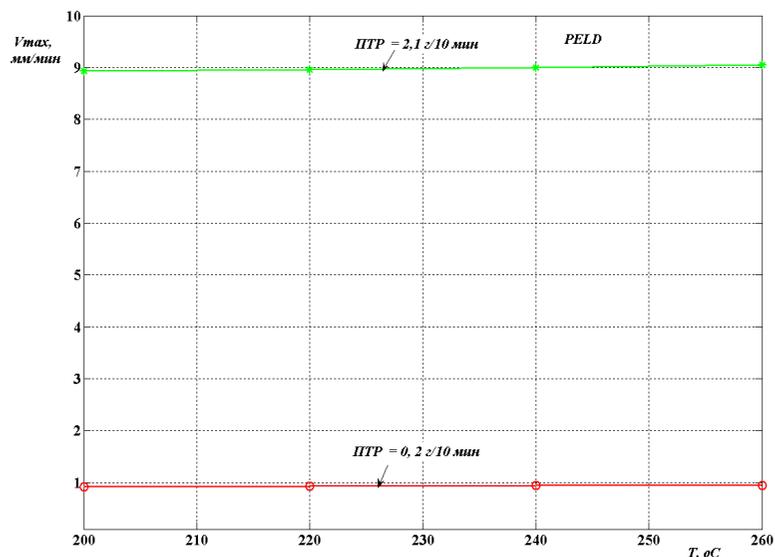


Рис. 8 - Влияние температуры в кольцевом зазоре на максимальную скорость течения расплава

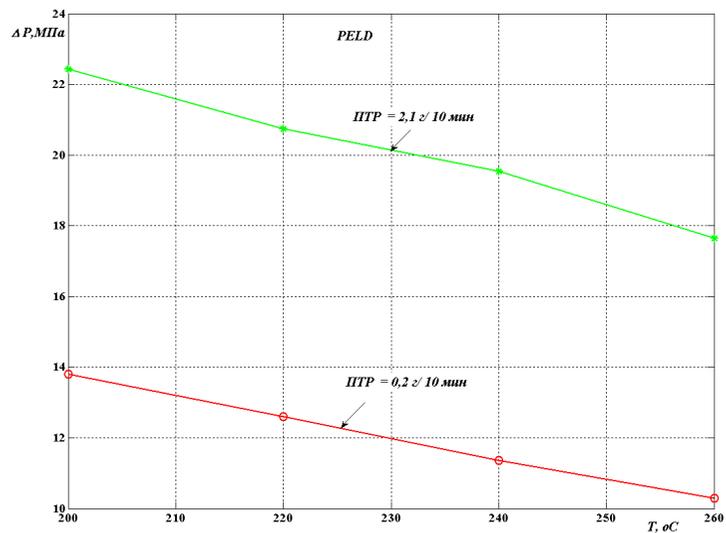


Рис. 9 - Влияние температуры в кольцевом зазоре на рабочее давление. ные периодические искажения; истечение струи при этом сопровождается ее вращением

**Четвертая** и последняя степень интенсивности – крупномасштабные нерегулярные дефекты; поверхность струи становится рваной, в некоторых случаях разрывы струи сопровождаются резкими хлопками.

В настоящее время принято считать, что неустойчивое течение возникает вследствие развития в потоке больших эластических деформаций. При этом различают два основных механизма возникновения неустойчивого течения: 1. пульсации на входе; 2. ориентация пристенных слоев расплава, вызывающая частичную кристаллизацию (стеклование) и приводящая к возникновению периодического проскальзывания.

Появление поверхностных дефектов является серьезным препятствием для повышения производительности технологического оборудования при экструдировании термопластов. Отодвинуть момент достижения критической скорости сдвига можно путем:

1. Установки конического диффузора на входе в канал. Это позволяет уменьшить абсолютные размеры дефектов и повысить предельное значение напряжения сдвига, при котором качество поверхности остается еще удовлетворительным.

2. Повышения температуры расплава.

**На рис. 4 – 9 представлены результаты расчета** течения полиэтилена низкой плотности с учетом его реологических неньютоновских свойств в кольцевых зазорах (рис.3): 1.  $L = 107$  мм,  $d_{\text{внутр}} = 8$  мм и  $d_{\text{внешн}} = 8,7$  мм (рис. 4 - 5); 2.  $L = 8,8$  мм,  $d_{\text{внутр}} = 7$  мм,  $d_{\text{внешн}} = 7,05$  мм (рис. 6 - 9). Для ПЭ с показателем текучести расплава (ПТР) 2,1 и 0,2 г / 10 мин увеличение температуры на

30 % в кольцевом зазоре приводит к уменьшению скорости сдвига на внутренней поверхности зазора на 6 – 12 %. Напряжение сдвига уменьшается в большей степени: на 27 – 36 % соответственно. При этом рабочее давление в зазоре также меняется существенно: на 35 -27 %. Максимальная скорость в обоих случаях меняется незначительно: на 1,4 – 3 %.

**Таким образом,** повышение температуры в кольцевом зазоре позволяет регулировать момент достижения критической скорости сдвига. Причем, в большей степени для расплавов с меньшими значениями ПТР. При этом уменьшается вероятность образования поверхностных дефектов оболочки.

**Список литературы:** 1. Привезенцева В. А. Основы кабельной техники: учебное пособие для вузов / под ред. В. А. Привезенцева. - Изд. 2-е перераб. и доп.- М.: «Энергия», 1975. 2. Пешков И.Б. Основы кабельной техники / И.Б.Пешков. - М.: Издательский центр «Академия», 2006.- 426 с. 3.Основные процессы переработки полимеров (теория и методы расчета).- М.: «Химия», 1972. 4. Иоргачев. Д.В. Волоконно-оптические кабели. Теоретические основы. Конструирование и расчет, технология производства и эксплуатация / Д.В. Иоргачев. – Одесса: «Астропринт».- 2000.-535 с. 5. Беспрозванных А.В. Эффективная вязкость полимерных материалов оптического модуля / А.В.Беспрозванных, И.А. Морозов // Вестник НТУ «ХПИ». – 2006. -№ 7. - С. 53-58.

Поступила в редакцию 03.09.2010