

# Расчет необогреваемых литниковых систем литевых форм для термопластов

И.А. Барвинский, И.Е. Барвинская (ООО «Инженерная фирма АБ Универсал», Москва)  
*III Международный инструментальный саммит. Москва. 17-18 июня 2008 г. Препринт.*

Конструкция необогреваемых литниковых систем оказывает большое, нередко решающее влияние на качество, себестоимость и эксплуатационные характеристики литевых изделий из термопластичных материалов. Уменьшение себестоимости обеспечивается уменьшением объема литниковой системы, сокращением времени цикла, повышением устойчивости процесса к изменению условий, в том числе характеристик сырья и условий окружающей среды. Эта тема включает множество аспектов, в данном сообщении мы остановимся на некоторых из них. Хотя основные принципы и подходы могут применяться для всех типов конструкций литников, мы ограничимся рассмотрением литниковых систем, содержащих центральный, разводящие и впускные литники.

## Стадия впрыска

За необогреваемыми литниковыми системами закрепилось название «холодноканальные» (в английском варианте «cold runner»), хотя оно не точно характеризует температуру в канале и поведение полимерного материала в подобных литниках. Относительно низкой является средняя температура полимера по сечению канала, максимальная температура расплава высокая и зависит от скорости впрыска.

При течении расплава полимера в необогреваемых каналах у стенки образуется застывший слой, уменьшая сечение канала. Толщина застывшего пристенного слоя определяется конкуренцией двух процессов: отвода тепла от расплава полимера через слой застывшего полимера и стенку канала и диссипации тепла в расплаве [1]. Обычные полимерные материалы плохо пропускают тепло (исключением являются специальные теплопроводные полимерные композиции). Коэффициент теплопроводности основных промышленных полимеров и их композиций находится в пределах 0.04-0.75 Вт/(м · °С), тогда как для сталей, применяемых в пресс-формах, он составляет примерно 20-75 Вт/(м · °С).

Количество тепла ( $q$ ), выделяемого при сдвиговом течении в результате диссипации в единице объема в единицу времени для слоя расплава, определяется соотношением:  $q = \eta \dot{\gamma}^2$ , где  $\eta$  - эффективная вязкость расплава,  $\dot{\gamma}$  - скорость сдвига [2]. Для неизотермического установившегося течения расплава в канале при симметричных условиях охлаждения скорость сдвига равна нулю в центре канала и максимальна вблизи границы расплава и застывшего слоя полимера. Характер распределения температуры по сечению канала зависит от скорости течения полимера. При низкой и средней скорости впрыска для симметричного охлаждения максимум температуры находится в центре канала. При высокой скорости впрыска наблюдается повышение температуры вблизи границы расплава и застывшего слоя полимера. При слишком высокой скорости впрыска может происходить термо- и термоокислительная деструкция полимера в литниковом канале.

При регулировании скорости впрыска применяются два подхода. В первом подходе обеспечивают постоянство температуры фронта расплава при заполнении центрального и разводящего литника. Альтернативный подход предполагает разогрев расплава в центральном и разводящих литниках. Это позволяет уменьшить температуру полимера в материальном цилиндре, что важно для материалов с пониженной термостабильностью.

Модели процесса литья, используемые в современном коммерческом компьютерном анализе, позволяют напрямую связать конструктивные особенности литниковой системы с отдельными характеристиками качества готового изделия. Например, в программных продуктах Moldflow Plastics Insight (MPI) можно считать коробление, усадку, для прозрачного материала - двойное лучепреломление.

В большинстве случаев рассчитывается некоторый набор характеристик процесса, взаимосвязь которых с характеристиками качества изделия является сложной. Для интерпретации результатов расчетов полезно определить конструктивные особенности изделия (например, основную толщину) и особенности полимерного материала, которые влияют на процесс литья. На поведение при литье большое влияние оказывают термостабильность расплава полимера, способность к кристаллизации, наличие наполнителей и добавок, а также другие факторы. Особых условий переработки требуют термопластичные эластомеры.

Одно из основных требований к литниковой системе – обеспечение заполняемости отливки. Этот вопрос особенно важен для тонкостенных изделий и изделий средней толщины при большом отношении длины затекания к толщине стенки. В современном компьютерном анализе недолив можно смоделировать, однако для этого требуется информация о фактическом состоянии литейной машины и учет всех существенных факторов, влияющих на потери давления расплава при заполнении формы. Наиболее полно состояние литейной машины можно оценить по ее инжекционной характеристике: зависимости максимальной объемной скорости впрыска от давления /3-7/.

На точность расчета процесса литья термопластов влияют упрощения геометрической модели изделия, модель процесса, пресс-формы, полимерного материала, литейной машины. Погрешность расчета, в том числе и потеря давления при впрыске, требует специальной оценки для каждой задачи.

При течении расплава полимера в сходящихся каналах (сопло, переход от разводящего литника к впускному и др.) возникают дополнительные потери давления. Для учета этих, так называемых входных, потерь в настоящее время применяется метод Куэтта-Бегли /8/, использующий капилляры с разным отношением длины к диаметру, и ряд методов на основе измерения продольной вязкости /9/. Продольная вязкость является характеристикой течения растяжения (элонгационного течения) расплава /10-12, 34/. Применение данных подходов связан с некоторыми проблемами. Большое влияние на определение входных потерь оказывает метод расчета /13/. Современные базы данных по термопластичным материалам содержат реологическую информацию в основном для сдвиговой вязкости, информация по коэффициентам Куэтта-Бегли и продольной вязкости приводится для относительно небольшого числа марок полимеров. Значение имеет и то обстоятельство, что эти характеристики не контролируются изготовителями материалов.

На практике информация о фактическом состоянии литейной машины обычно отсутствует. Поэтому оценку заполняемости изделий проводят на основе расчета потерь давления при впрыске, так чтобы изделие заполнялось в режиме управления скоростью впрыска до 92-99% объема. Рассчитанные потери давления сравнивают с допустимыми потерями давления для заданной литейной машины /14/.

Для новой литейной машины допустимые потери давления при течении расплава в литниковой системе и полости можно оценить на основе паспортного максимального давления машины с учетом потерь давления в сопле, материальном цилиндре и гидросистеме /15/. Потери давления в сопле зависят от его конструкции, реологических характеристик полимера и скорости впрыска /16-17/. Для более точных оценок сопло может быть включено в геометрическую модель. Влияние износа машины на допустимые потери давления требует специальной оценки.

Длина затекания расплава полимера в полости складывается из двух участков: заполнения в режиме управления скоростью впрыска и заполнения в режиме управления давлением /18/. Потери давления при впрыске характеризуют первый участок, поэтому описанный выше метод дает завышенную оценку давления, необходимого для заполнения.

Важно учитывать, что отсутствие недолива – необходимое, но недостаточное условие получения качественного изделия. Существуют еще требования обеспечения размерной точности изделия, качества поверхности и спаев в конце потоков. Эти характеристики качества изделия в значительной степени зависят от температуры фронта и других параметров расплава на участке заполнения после переключения в режим постоянного давления. Скорость впрыска до переключения оказывает большое влияние на длину второго участка /18/ и изменение температуры фронта расплава на этом участке. При расчете конкретной отливки можно количественно оценить это влияние. Существенное повышение температуры фронта расплава из-за диссипации тепла на начальном участке как и существенное понижение на конечном участке приводит к дефектам литейного изделия.

На практике применяется множество типов впускных литников, обеспечивающих различные условия охлаждения и деформирования расплава при его течении по литнику и при входе в изделие /19-24, 35/.

Во многих отношениях впускной литник является наиболее проблемным местом литниковой системы. Уменьшение толщины впускного литника, желательное с точки зрения внешнего вида изделия, может быть причиной снижения качества изделия.

Одна из проблем тонких впускных литников – механодеструкция полимера. Следствием механодеструкции могут быть поверхностные дефекты и снижение механических характеристик полимера. Появление механодеструкции связывают с критическими условиями сдвигового тече-

ния: напряжением и скоростью сдвига /25/, однако к настоящему времени эти условия применительно к литью термопластов изучены недостаточно. В работе /26/ определены критические скорости сдвига для нескольких материалов. Согласно /27/ критические значения скоростей сдвига для литьевых термопластов в основном находятся в пределах 10000-100000 1/с.

Для термопластичных эластомеров на основе смесей термопластов с каучуками, а также для некоторых других типов композиций термопластов при высоких скоростях сдвига может происходить изменение фазовой структуры материала /19/. Фазовое разделение приводит к ухудшению внешнего вида и эксплуатационных характеристик литьевых изделий.

С конструкцией области перехода от разводящего литника к впускному, впускного литника и области входа в изделие связан комплекс явлений, который получил название неустойчивого течения /11, 28-31/. Неустойчивое течение при литье термопластов может проявляться в различных формах, в том числе в виде струйного заполнения или разнообразных по внешнему виду следов течения. Закрученная в спираль струя возникает на входе в изделие при высокой скорости впрыска /32/. Имеются данные, что струйное заполнение может проявляться и при малых скоростях впрыска. В работе /33/ наблюдали струйное заполнение при небольших скоростях впрыска для полиамида 66, наполненного 50% длинного стекловолокна, причем при повышении скорости впрыска струйное заполнение исчезало.

Были предложены различные критерии появления неустойчивого заполнения в условиях литья под давлением /36-37/, однако ни один из них не является универсальным. Формулировка критических условий деформирования расплава полимера при литье термопластов – очень сложная и на сегодняшний день нерешенная задача. Прогнозирование неустойчивого заполнения в настоящее время представляется наиболее трудным вопросом при расчете литниковой системы.

Для устранения дефектов изделий, обусловленных высокой скоростью течения расплава во впускных литниках и на входе в изделие, применяют ступенчатое регулирование объемной скорости впрыска, предусматривающее снижение скорости впрыска при прохождении фронтом расплава впускного литника и области входа /38/. Использование профиля скорости впрыска позволяет устранить неустойчивое заполнение, но не решает проблему механодеструкции полимера, которая может происходить на впускном литнике и после входа фронта расплава в литьевую полость.

Представляют интерес конструктивные решения литниковой системы, позволяющие уменьшить скорость течения расплава на впускном литнике. К таким решениям относятся применение двойных /39/ или даже четверных /40/ впускных литников. В этом случае расплав входит в изделие несколькими потоками, скорость течения на каждом впускном литнике снижается и остается низкой в течение всего процесса заполнения, что важно для предотвращения механодеструкции. Еще одной интересной идеей является использование впуска с предварительным распределителем (gate with pre-distributor) /40/. Распределитель - это два боковых отвода от разводящего литника с таким же сечением, как и разводящий литник. Их длина рассчитывается так, чтобы они оказались заполненными после того, как фронт расплава войдет в полость формы.

В литниковых системах с разветвлениями после разветвления происходит искажение профиля температуры по сечению канала. В этом случае литниковая система может оказывать влияние на растекание расплава в полости и сбалансированность заполнения даже в конструкциях с одним впуском /19/. При моделировании одномерного течения расплава в литниковой системе эти явления не учитываются. Их можно учесть, если моделирование предусматривает трехмерное течение расплава в литнике /41/. Однако применение 3D-модели течения в литниковых каналах приводит к нежелательному увеличению числа элементов сетки. В работе /42/ при расчете в МРІ 6.1 литья полипропилена и АБС-пластика для модели одномерного течения в литниках получили лучшее соответствие распределения давления в полости с экспериментом, чем для модели с трехмерным течением.

Для устранения данной проблемы разработаны специальные конструкции литников, использующие разделение потока расплава на два потока с последующим поворотом потоков на 90-180° относительно их осей и соединением в новом потоке /43/. Данный метод позволяет получить более благоприятное распределение температуры по течению канала. С помощью этого же метода можно устранить ускоренное течение расплава вблизи торцов изделия, связанное с влиянием повышенного диссипативного тепловыделения в расплаве /43-44/.

При переработке материалов, содержащих жесткие волокнистые наполнители, такие как стекловолокно и углеволокно, необходимо принимать во внимание ряд дополнительных требований к конструкции литниковой системы. Условия переработки зависят от длины частиц волокна.

Широкое распространение получили термопластичные материалы, наполненные коротким стекловолокном с основной длиной частиц волокна около 0.2-0.7 мм. Для таких материалов рекомендуется применять впускные литники с минимальной толщиной/диаметром не менее 1.5 мм, оптимально - 2.3-2.5 мм /45/. Использование тонких впускных литников приводит к неравномерному распределению волокна в изделии. Необходимо учитывать, что распределение частиц волокна по длинам является широким, небольшая часть волокна может иметь длину, превышающую 1 мм и даже 1.5 мм /33/. Известно, что отдельные частицы стекловолокна, перегораживая тонкий канал способны изменять реологическое поведение материала /46/. Эксплуатационные свойства термопластичных материалов, наполненных стекловолокном, в большой степени определяются длиной волокна в изделии. Уменьшение толщины впускного литника приводит к более интенсивному разрушению стекловолокна при течении расплава, что приводит к снижению прочности и жесткости материала /33/.

### Стадия уплотнения

Для изделий средней и повышенной толщины качество поверхности и размерная точность определяются условиями стадии уплотнения. Такие изделия часто можно заполнить расплавом и при тонких разводящих литниках, когда диаметр/толщина разводящих литников меньше толщины изделия. Однако для хорошего уплотнения изделий необходимо применять разводящие литники с толщиной большей, чем толщина изделия /47/. В настоящее время принято считать, что для изделий средней толщины диаметр/толщина разводящих литников должен не менее чем на 1-1.5 мм превышать толщину изделия /23, 48/. Тонкие разводящие литники применяются в ограниченном числе случаев: для «чувствительных к скорости сдвига» полимеров, вязкость которых слабо зависит от температуры, и для которых процесс уплотнения не оказывает большого влияния на качество изделия. К таким материалам, например, относятся некоторые типы термоэластопластов.

Для обеспечения хорошего уплотнения переход от разводящего литника к впускному должен быть как можно более коротким. Длинный переход затрудняет передачу давления в полость из-за быстрого роста застывшего пристенного слоя полимера после окончания впрыска. С этой точки зрения наиболее благоприятные условия уплотнения создают конструкции с предельно коротким переходным участком /24, 49/.

Изменение давления в литьевой полости при уплотнении и охлаждении изделия во многом зависит от конструкции впускного литника. Длинный и тонкий впускной литник затрудняет передачу давления в гнездо формы на стадии уплотнения, способствует повышению перепада давления. При перестывании впускного литника подпитка прекращается, давление в полости быстро уменьшается. Слишком быстрое снижение давления в полости приводит к преждевременному отделению изделия от формирующей поверхности за счет усадки по толщине, что является одной из основных причин ухудшения качества поверхности изделия. Давление в полости на стадии уплотнения можно увеличить при повышении давления выдержки, однако высокое давление выдержки не всегда можно применять из-за ряда ограничений.

Расчет уплотнения предполагает расчет всех фаз процесса: нарастания давления, выдержки под высоким давлением, снижения давления. В фазе нарастания давления происходит уменьшение перепадов давления, которые возникли в процессе заполнения, в системе: гнездо формы – литник – сопло литьевой машины – материальный цилиндр /15/. Поэтому для большей точности расчета необходимо включать сопло литьевой машины в геометрическую модель.

Моделирование процесса уплотнения с использованием современного коммерческого компьютерного анализа связано с рядом проблем.

Точность расчета давления в полости формы определяется многими факторами. Большое влияние на процесс уплотнения оказывает зависимость сдвиговой вязкости от давления /10/. Системы анализа включают реологические модели, учитывающие влияние давления на сдвиговую вязкость, например, модель Кросса-ВЛФ /27/. Экспериментальное измерение зависимости сдвиговой вязкости от давления требует специальных методик и является более трудоемким по сравнению с традиционными реологическими измерениями. В современных базах данных информация по зависимости сдвиговой вязкости от давления доступна для небольшого числа марок полимерных материалов. Зависимость продольной вязкости от давления обычно не учитывается, хотя влияние давления на продольную вязкость для многих полимеров больше, чем на сдвиговую /50-51/.

Расчет объемной усадки в современном компьютерном анализе выполняется с использованием экспериментально полученных зависимостей удельного объема полимерного материала от давления и температуры (PVT), которые определяются в условиях медленного охлаждения при отсутствии течения. Известно, что скорость охлаждения /52/ и течение оказывает сильное влияние на PVT-поведение кристаллизующихся полимеров. Разработаны методы определения PVT-диаграмм при быстром охлаждении и сдвиговом течении /53-54/, однако к настоящему времени получены экспериментальные данные только для отдельных марок полимеров.

Увеличение толщины/диаметра впускного литника способствует улучшению уплотнения, что повышает качество поверхности изделия и снижает неравномерность объемной усадки, но может вызывать ряд проблем. В ряде работ /55-56 и др./ отмечается, что длительная подпитка может стать причиной повышенных остаточных напряжений из-за увеличенной степени ориентации внутренней области изделия. Последнее имеет большое влияние на оптические свойства, химическую стойкость и размерную стабильность изделий. При преждевременном прекращении действия давления выдержки может наблюдаться так называемое «обратное течение» расплава полимера из изделия в литниковую систему /57-58/, что приводит к снижению качества поверхности изделия вблизи впуска и другим дефектам.

Работоспособность литниковой системы определяется не только ее геометрией, но и теплопереносом от поверхности литниковых каналов. Уменьшение теплопереноса позволяет улучшить уплотнение изделия, не увеличивая толщину литников. Теплоперенос можно уменьшить при использовании для деталей пресс-формы материалов с низкой теплопроводностью, а также воздушных зазоров между деталями пресс-формы.

В некоторых случаях, особенно при малых циклах литья, в область впуска поступает избыточное количество тепла от расплава /59/, что может приводить к дефектам поверхности изделия. Тепловой расчет пресс-формы позволяет более точно учесть влияние этих факторов на процесс литья.

## Литература

1. Brinkman H.C. Heat effects in capillary flow. I // Appl. Sci. Res. 1951. V. A2. P. 120-124.
2. Мак-Келви Д.М. Термодинамика и теплопередача // Бернхардт Э. (составитель) Переработка термопластичных материалов. - М.: Химия, 1965. С. 89-130.
3. Глухов Е.Е., Попов Е.Н. Инжекционные характеристики литьевых машин и расчет форм // Пласт. массы. 1980. № 3. С. 43-44.
4. Попов Е.Н., Глухов Е.Е. Инжекционная характеристика литьевых машин // Литье под давлением изделий из термопластов. -М.: МДНТП, 1979. С. 156-161.
5. Попов Е.Н., Глухов Е.Е., Сагалаев Г.В. Основная технологическая характеристика литьевой машины // Пласт. массы. 1980. № 1. С. 30-31.
6. Симонов-Емельянов И.Д., Батий В.М., Глухов Е.Е. Расчет параметров процесса литья под давлением с использованием инъекционной характеристики литьевой машины // Пласт. массы. 1981. № 3. С. 39-41.
7. Borregaard L. Why and how to measure injection power // SPE ANTEC Tech. Papers. 1998. V. 44.
8. Bagley E.V. End corrections in the capillary flow of polyethylene // J. Appl. Phys. 1957. V. 28. P. 624-627.
9. Gupta M. Estimation of elongational viscosity of polymers for accurate prediction of juncture losses in injection molding // SPE ANTEC Tech. Papers. 2001. V. 47. P. 794-798.
10. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. - М.: Химия, 1977. 440 с.
11. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: Концепции, методы, приложения. -СПб: Профессия, 2007. 558 с.
12. Сабсай О.Ю., Чалай Н.М. Технологические свойства термопластов (обзор) // Пласт. массы. 1992. № 1. С. 5-13.
13. Sunder J. Extensional flow properties from entrance pressure measurements using zero length die versus Bagley correction // SPE ANTEC Techn. Papers. 2001. V. 47.
14. Катышков Ю.В., Самойлова С.П., Макаров В.Л., Абрамов В.В. Расчет литниковых систем на персональных ЭВМ. Сбалансированные системы // Пласт. массы. 1991. № 2. С. 56-58.
15. Калинин Э.Л., Калинин Е.И., Саковцева М.Б. Оборудование для литья пластмасс под давлением: Расчет и конструирование. - М.: Машиностроение, 1985. 256 с.
16. Калинин Э.Л., Восторгов Б.Е. Расчет потерь давления в соплах литьевых машин // Пласт. массы. 1972. № 8. С. 17-19.
17. Восторгов Б.Е., Калинин Э.Л. Расчет сопел литьевых машин // Пласт. массы. 1975. № 3. С. 54-57.
18. Калинин Э.Л., Восторгов Б.Е. Формуемость термопластов при литье под давлением // Пласт. массы. 1973. № 7. С. 18-21.
19. Beaumont J.P. Runner and gating design handbook: Tools for successful injection molding. Hanser, 2004. 286 p.
20. Rees H. Mold engineering. Hanser, 2002. 688 p.
21. Басов Н.И., Брагинский В.А., Казанков Ю.В. Расчет и конструирование формирующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов. -М.: Химия, 1991. 352 с.
22. Бемон Дж. Конструкция формы // Литье пластмасс под давлением / Под ред. Т. Освальда, Л.-Ш. Тунга, П.Дж. Грэмманна. Пер с англ. под ред. Э.Л. Калининчева. - СПб: Профессия, 2006. С. 377-447.

23. Менгес Г., Микаэли В., Морен П. Как сделать литьевую форму. Пер. с англ. под ред. В.Г. Дувидзона, Э.Л. Калининцева. – СПб: Профессия, 2006. 632 с.
24. Пантелеев А.П., Шевцов Ю.М., Горячев И.А. Справочник по проектированию оснастки для переработки пластмасс. - М.: Машиностроение, 1986. 400 с.
25. Казале А., Портер Р. Реакции полимеров под действием напряжений. Пер. с англ. А.М. Кнебельмана, С.Г. Куличихина, под ред. А.Я. Малкина. -Л.: Химия, 1983. 440 с.
26. Serrano M., Little J., Chilcoat T. Critical shear rate for the injection molding of polycarbonate, polystyrene, and styrene acrylonitrile // SPE ANTEC Techn. Papers. 1995. V. 41. P. 357-365.
27. Moldflow Plastics Insight. Версия 6.2. Moldflow Corp., 2008.
28. Larson R.G. Instabilities in viscoelastic flows // Rheol. Acta. 1992. V. 31. P. 213-263.
29. Petrie C.J.S., Denn M.M. Instabilities in polymer processing // AIChE J. 1976. V. 22. P. 209-236.
30. Малкин А.Я., Леонов А.И. Неустойчивое течение полимеров // Успехи реологии полимеров / Под ред. Г.В. Виноградова. - М.: Химия, 1970. С. 98-117.
31. Малкин А.Я. Неустойчивость при течении растворов и расплавов полимеров // ВМС. 2006. Т. А48. С. 1241-1262.
32. Thienel P. Troubleshooting guide for injection molding. - Luedenscheid: KIMW NRW GmbH, 1992. 88 p.
33. Akay M., Barkley D. Jetting and fibre degradation in injection moulding of glass-fibre reinforced polyamides // J. Mater. Sci. 1992. V. 27. P. 5831-5836.
34. Han C.D. Rheology and processing of polymeric materials. V. 1. Oxford University Press, 2007. 707 p.
35. Outlaw W.D. Cold runner gate types // Plastics technician's toolbox. V. 5 / Ed. by A.R. Calhoun, J. Golmanovich. The Society of Plastics Engineers, 2002. P. 101-105.
36. Oda K., White J.L., Clark E.S. Jetting phenomena in injection mold filling // Polym. Eng. Sci. 1976. V. 16. P. 585-592.
37. Desai S.S., Barry C.M.F. Evaluation of flow instabilities using simulations // SPE ANTEC Tech. Papers. 2003. V. 49. P. 3529-3533.
38. Rowland J.C., Ho-Le K. Process quality assurance for injection molding of thermoplastic polymers // SPE ANTEC Techn. Papers. 1994. V. 40.
39. The development and design of injection moulds. ATI874e. Bayer AG, 1993.
40. Erlenkaemper E. Gate design for a high-quality surface finish. ATI 1125d,e. Bayer AG, 2000. 34 p.
41. Chien J.C., Huang C.-T., Hsien W.-H., Hsu D.C. True 3D CAE visualization of "intra-cavity" filling imbalance in injection // SPE ANTEC Tech. Papers. 2006. V. 52. P. 1153-1157.
42. Marin A.M. Pressure prediction verification studies using 3D CAE injection molding simulation software. Thesis. University of Massachusetts Lowell, 2006.
43. Beaumont J., Stewart C., Ezzo M. Controlling intra-cavity melt flow and weld strength through new runner design technology // SPE ANTEC Tech. Papers. 2005. V. 51. P. 860-864.
44. Cleveland S.R., Latchaw J.P. Runner diameter and length effects on molded-in stresses of injection molded parts // SPE ANTEC Tech. Papers. 2004. V. 50. P. 834-838.
45. Charbonneau R.L. Glass-filled materials // Plastics technician's toolbox. V. 6 / Ed. by J. Golmanovich. The Society of Plastics Engineers, 2002. P. 77-79.
46. Малкин А.Я., Куличихин С.Г., Мартынюк В.М., Бокарева Э.З. Особенности течения стеклонаполненных полиамидов при определении ПТП // Пласт. массы. 1980. № 3. с. 58.
47. Видгоф Н.Б. Основы конструирования литьевых форм для термопластов. – М: Машиностроение, 1979. 265 с.
48. Beaumont J.P., Nagel R., Sherman R. Successful injection molding: Process, design and simulation. Hanser, 2002. 362 p.
49. Cechacek J. Problematik der Werkzeugkonstruktion, der Angussgestaltung und der Werkzeugtemperierung fuer die Herstellung von Praezisionsformteilen // Plast. u. Kautsch. 1975. B. 22, № 2. S. 182-188.
50. Binding D.M., Couch M.A., Walters K. The pressure dependence of the shear and elongational properties of polymer melts // J. Non-Newtonian Fluid Mech. 1998. V. 79. P. 137-155.
51. Christensen J.H., Kjær E.M. Pressure effect on extensional viscosity // SPE ANTEC Tech. Papers. 1998. V. 44.
52. Menges G., Thienel P. Pressure-specific volume-temperature behavior of thermoplastics under normal processing conditions // Polym. Eng. Sci. 1977. V. 17. P. 758-763.
53. Van der Beek M.H.E., Peters G.W.M., Meijer H.E.H. A dilatometer to measure the influence of cooling rate and melt shearing on specific volume // Int. Polym. Process. 2005. V. 20. P. 111-120.
54. Zuidema H., Peters G.W.M., Meijer H.E.H. Influence of cooling rate on pVT-data of semi-crystalline polymers // J. Appl. Polym. Sci. 2001. V. 82. P. 1170-1186.
55. Лапшин В.В. Основы переработки термопластов литьем под давлением. - М.: Химия, 1974. 270 с.
56. Бортников В.Г. Производство изделий из пластических масс. В 3-х т. Т. 3. –Казань: Дом печати, 2004. 311 с.
57. Jansen K.M.B., Pantani R., Titomanlio G. As-molded shrinkage measurements on polystyrene injection molded products // Polym. Eng. Sci. 1998. V. 38. P. 254-264.
58. Pantani R., Sorrentino A., Speranza V., Titomanlio G. Molecular orientation in injection molding: experiments and analysis // Rheol. Acta. 2004. V. 43. P. 109-118.
59. Видгоф Н.Б. Современные направления в области конструирования и расчетов литьевых форм // Литье под давлением изделий из термопластов. Материалы семинара. - М.: МДНТП, 1979. С. 166-173.

(С) И.А. Барвинский, И.Е. Барвинская

Тел./факс (495) 5812732, e-mail: [ibarvinsky@yandex.ru](mailto:ibarvinsky@yandex.ru)

Сайт «Литье пластмасс»: <http://www.barvinsky.ru> (новый адрес)

Блог: <http://plast-center.livejournal.com> (для входа необходимо включить cookie)