

При экструзии полимеров с наружной стороны сходящихся потоков образуются вихревые структуры, оказывающие негативное влияние на качество получаемых экструзией изделий. На образование и рост таких вихревых структур существенное влияние оказывают упругие свойства полимеров. В задачах по определению формы и размеров вихревых структур необходимо учитывать влияние сингулярности производных на выступах. Несмотря на исключительную важность проблемы, количество публикаций в этой области недостаточно, а происходящие в окрестности сходящегося потока процессы до сих пор недостаточно поняты. До настоящего времени также отсутствуют четкие экспериментальные и теоретические данные, позволяющие однозначно определить основные причины и механизмы неустойчивости течения экструдата. Тем не менее, большинство авторов пришло к мнению о негативном влиянии вихревых областей с наружной стороны сходящихся потоков на устойчивость экструдата. Математическая формулировка задачи

Рассмотрим следующую модель течения вязкоупругой жидкости в канале с резким сужением, характерным для экструзионной головки. Схема течения представлена на рис.1. В верхней области потока жидкость имеет полностью развитый профиль, затем входит в экструзионную головку, характеризующую резким сужением потока, и далее движется в плоской щели или в цилиндрическом капилляре. На твердых стенках выполняется условие прилипания. На выходе из канала задаются условия установившегося потока: поперечная компонента скорости равна нулю, а продольная компонента скорости изменяется только по радиусу, т.е. . Для описания установившегося течения несжимаемой жидкости с постоянными свойствами при отсутствии внешних сил используются уравнения Навье-Стокса и уравнение неразрывности, имеющие следующий вид: , (1) . (2) Рис. 1 - Схема течения с резким сужением

Для описания вязкоупругих свойств жидкости была выбрана релаксационная модель Максвелла-В (UCM) [1]. Данная модель, несмотря на свою простоту, дает хорошее качественное описание реального поведения вязкоупругих жидкостей в режиме ползущего течения. Наличие конвективной производной приводит к ненулевой разности нормальных напряжений, то есть к учету упругих свойств материалов. Уравнение состояния в этом случае записывается следующим образом: , (3) где λ - время релаксации, η - вязкость, \mathbf{D} - тензор скоростей деформации, записанный в виде: , (4) где: \mathbf{T} - символ транспонирования. Символ над тензором сдвиговых напряжений обозначает контравариантную конвективную производную и записывается следующим образом: . (5) Задача решается в системе координат (z,r) . Тогда уравнения (1)-(3) запишутся: (6) (7) (8) (9) (10) (11) Запишем следующие граничные условия: 1. 2. 3. 4. Здесь задаются продольными координатами верхней и нижней границы потока соответственно. В качестве безразмерных параметров при исследовании изотермических течений примем числа Деборы и Рейнольдса в виде: , (12) где U_0 - характерная сдвиговая скорость (обычно

принимается на стенке на входе в канал); характерная скорость; характерный линейный размер (обычно используется полуширина канала). Результаты моделирования Для моделирования течения расплава полимера во входном канале экструзионной головки были использованы две расчетные схемы процесса: одна схема (рис.1) представляет собой канал, характеризующийся резким сужением; другая схема характеризуется плавным переходом из широкой части канала в узкую часть, являющуюся элементом экструзионной головки. Расчеты проводились методом контрольных объемов с использованием модифицированного алгоритма SIMPLER. При написании источниковых членов была применена схема расщепления напряжений на вязкоупругую и вязкую части ; ; . Здесь обозначает вязкоупругую часть тензора напряжений. Вся расчетная область делится на контрольные объемы. Узловые точки располагаются в геометрических центрах этих контрольных объемов. Узловые точки для давления расположены в центрах основной сетки. Для продольной и поперечной компонент скорости применена шахматная сетка. Сетка для продольной компоненты скорости сдвинута вправо, узловые точки поперечной компоненты скорости лежат на правых гранях контрольных объемов для давления. Сетка для поперечной компоненты скорости сдвинута вверх, узловые точки лежат на верхних гранях контрольных объемов для давления. Расчеты проводились на четырех различных сетках, соответствующих различной форме расчетной области и характеризующихся переменным шагом и различным количеством узлов. Расчеты проведены для различных чисел Деборы (De , где t_r - время релаксации напряжений; t_p - характерное время процесса) в интервале от нуля до пяти и для постоянного значения числа Рейнольдса $Re=0.05$. Расчеты показывают, что сглаживание входного участка приводит к некоторому уменьшению размеров области циркуляционного течения при небольших значениях времени релаксации напряжения. Данный вывод четко прослеживается на рис.2, на котором приведены также данные по экспериментальному исследованию зависимости размеров циркуляционной области для 2,5% раствора полиизобутилена и полибутена в декалине [2], хорошо описываемого конститутивной реологической моделью типа UCM. Полученные в настоящем исследовании теоретические результаты удовлетворительно согласуются с представленными экспериментальными данными. Так как одной из целей настоящего исследования являлся анализ влияния неньютоновских свойств жидких полимерных материалов на размеры и форму циркуляционной зоны вблизи входного участка формирующей головки экструдера, то получена зависимость интенсивности течения в вихревой области от числа Деборы (рис.3). Рис. 2 – Зависимость безразмерной области циркуляционного течения от числа Деборы. 1 – результат моделирования для входа с острой кромкой; 2 – результат моделирования для входа со сглаженной кромкой; ● - экспериментальные данные для входа с острой кромкой; ■ -

экспериментальные данные для входа со сглаженной кромкой С этой целью введена безразмерная величина, имеющая смысл интенсивности вихревого течения в зоне циркуляционного потока: φ , где φ - значение функции тока в ядре циркуляционной области; φ_0 - значение функции тока на оси канала. Из рис. 2-3 следует, что упругие свойства экструдата заметно влияют на размеры и интенсивность циркуляционной области. Рис. 3 - Зависимость интенсивности вихревого течения от числа Деборы: 1 - результат моделирования для входа с острой кромкой; 2 - результат моделирования для входа со сглаженной кромкой. Для исключения образования вихревых зон на входе в формующую головку экструдера впервые предлагается использовать естественный входной профиль, определяемый нулевой линией тока (рис.4). До настоящего исследования переход из широкой части формующего канала экструзионной головки в узкую изготавливался по наклонной прямой. Однако, как показали проведенные исследования, это не исключает образование вихревых структур и может привести к неоднородной структуре экструдата, что нежелательно в процессах экструзии полимерных материалов. Использование естественного входного профиля позволило бы полностью исключить негативное влияние вихревых структур на качество получаемых изделий. Рис. 4 - Схема течения жидкости в канале со ступенчатой конфигурацией. Следует отметить, что для каждой рецептуры исходной полимерной смеси и для каждого технологического режима переработки полимеров необходимо рассчитывать свой естественный входной профиль; любое отклонение от него приведет к браку изделия.