

А. Г. Кутузов, С. А. Кутузов, Э. Р. Кутузова,
М. А. Рузанова, Г. С. Кутузова

ВЛИЯНИЕ ВЫБОРА РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРА В ЭКСТРУЗИОННОЙ ГОЛОВКЕ

Ключевые слова: реологическая модель, вязкоупругая жидкость, экструзия.

Рассматривается влияние выбора реологической модели на результаты моделирования.

Keywords: rheological model, viscoelastic liquid, extrusion.

The impact of the choice of the rheological model on the modeling results is regarded.

Точность полученных результатов во многом зависит от выбора реологической модели. Конститутивное реологическое соотношение определяет связь между напряжениями, возникающими в жидкости в результате результатов математического моделирования течения полимерных материалов течения, и скоростью деформации и зависит от природы материала, обладающего текучестью. Выбор реологического уравнения зависит, прежде всего, от того, для чего будет использоваться реологическую модель: для медленнопротекающих или для быстропротекающих технологических процессов, для получения аналитического решения поставленной задачи или для получения численного решения. Реологические свойства неньютоновских жидкостей зависят от многих факторов, в том числе от состава полимерных молекул (его химической природы), молекулярно-массового распределения полимера, его разветвленности и от концентрации полимерных макромолекул в растворителе (степени разбавленности полимерной жидкости). Совершенно очевидно, что концентрация полимера в растворителе в значительной степени влияет на реологические свойства вязкоупругих жидкостей и, соответственно, на свойства исследуемых течений.

Резиновые смеси, используемые для производства деталей шин и резинотехнических изделий экструзией, являются вязкоупругими материалами. На течение таких материалов будут оказывать существенное влияние такие свойства, как аномалия вязкости и продольная вязкость. Для ньютоновской жидкости вязкость не зависит от скорости сдвига, тогда как для неньютоновской жидкости вязкость есть функция от сдвиговой скорости. Поскольку, как показали наши исследования [1-3], вблизи выходной кромки насадки образуются значительные сдвиговые напряжения, то с ростом напряжений вязкость будет уменьшаться. В этом заключается эффект аномалии вязкости. Продольная вязкость возникает в продольных течениях под действием нормальных напряжений. Вследствие того, что непосредственно у твердой стенки в выходном сечении насадки возникают большие нормальные напряжения, продольная вязкость должна иметь конечное значение при любых величинах продольной скорости.

Совершенно очевидно, что описанные выше свойства полимерных жидкостей должны учиты-

ваться при выборе реологического конститутивного соотношения. Но большинство применяемых для данных исследований моделей аномалию вязкости не учитывают. Это относится к таким моделям, как модель Максвелла-А, модель Максвелла-Б, конститутивное реологическое соотношение Олдройда-Б. Во всех этих моделях, используемых для данных целей, продольная вязкость имеет значение только при небольших продольных скоростях.

Эффект аномалии вязкости учитывается в моделях **Фан-Тьен-Таннера** и **FENE – P**. Эти модели более сложные, но и более точные. Реологическая модель **Фан-Тьен-Таннера** предсказывает ненулевые первую и вторую разности нормальных напряжений, эффект аномалии вязкости и продольную вязкость.

Используемое в нашей работе реологическое конститутивное соотношение **FENE – P** предсказывает проявление эффекта аномалии вязкости и ненулевую первую разность нормальных напряжений. Эта модель также предсказывает то, что продольная вязкость имеет конечное значение при любых величинах продольной скорости.

Рассмотрим течение полимерной жидкости, подчиняющейся реологическому уравнению **Фан-Тьен-Таннера**, и течение полимерной жидкости, подчиняющейся реологическому уравнению **FENE–P**. Полученные результаты сравним между собой, особенно на линии трехфазного контакта. Напомним, что линией трехфазного контакта является линия раздела жидкости, твердого тела и окружающей воздушной среды.

На рис.1 показано распределение разности главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$ при использовании реологической модели **FENE – P**. На рис.1 видно, что возмущающее влияние линии трехфазного контакта очень велико. И как следует из результатов наших вычислений, представленных на рис. 1, оно приводит к значительному перераспределению напряжений и их концентрации вблизи кромок выходного сечения канала.

Известно, что ориентация макромолекул вдоль осевой линии только улучшает прочностные характеристики материала. С этой точки зрения повышенная ориентация макромолекул является положительным фактором процесса. Вся проблема заключается в следующем. При достижении напряжениями некоторого предельного значения такая

ситуация уже вредит процессу экструзии сырой резины, поскольку ориентированные участки области течения, находящиеся вблизи твердой стенки, приобретают новые свойства. Экструдат, в этом случае, в пристенных слоях будет приобретать свойства упругого гукковского тела. Образующиеся за счет частичной ориентации участков макромолекул квазисшивки переводят расплав в пристенном слое из вязкотекучего в высокоэластическое состояние. То есть вблизи стенки образуются участки с дальним порядком расположения атомов, что характерно для кристаллических тел. Как только касательные напряжения достигают критического значения, начинается проскальзывание ориентированных участков макромолекул, из-за чего могут происходить осцилляции и нарушения гладкости свободной поверхности.

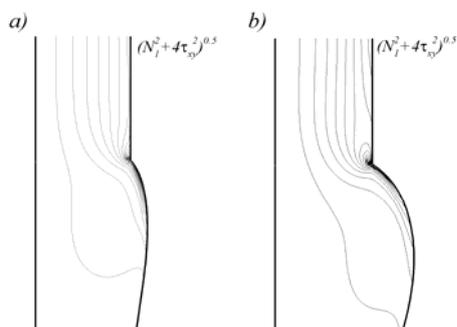


Рис. 1 - Распределение разности главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_2$ а) $We=1.0$, $L^2=1000$, б) $We=5.0$, $L^2=1000$

Механизм осцилляций можно объяснить следующим образом. Когда напряжения на твердой стенке достигает больших величин, полимерные макромолекулы ориентируются, расплав вблизи твердой стенки переходит в высокоэластическое состояние и возникает скольжение на твердой стенке. Это, в свою очередь, снижает напряжение на стенке и, соответственно, уменьшает степень ориентации. Снижение напряжений вблизи твердой стенки приводит к восстановлению условия прилипания полимерной жидкости. Таким образом, происходит периодическое изменение свойств жидкости вблизи стенки от вязкоупругого к высокоэластическому и обратно. Происходят периодические изменения граничных условий на стенке, что приводит к осцилляциям в жидкости и появлению периодических волн на свободной поверхности экструдата.

Исходя из описанного механизма осцилляций становится понятно, почему периодическое проскальзывание начинается именно в зоне трехфазного контакта и только потом, с ростом напряжений, распространяется вглубь насадки. Таким образом, знание местоположения, величины пиков напряжений и предельных значений касательных и нормальных напряжений позволяет определять наиболее опасные участки формирующей головки, где возможно проскальзывание экструдата.

Суммируя вышеизложенное, можно утверждать, что проскальзывание возможно, в первую очередь, в непосредственной близости от выхода из

экструзионной головки. Поэтому эта зона является наиболее опасной для возникновения эластической турбулентности.

На рис. 1 также отчетливо видно, что с увеличением числа Вейссенберга до $We = 5.0$ первая разность главных напряжений возрастает, значит, возрастает и степень ориентации макромолекул.

А это свидетельствует о том, что при изменении релаксационных свойств экструдата в сторону увеличения напряжения могут достигать критических значений. То есть вероятности наступления проскальзывания ориентированных участков макромолекул увеличится. Так же видно, что с увеличением числа We увеличивается степень разбухания струи экструдата, что также необходимо учитывать технологом при проектировании формирующих насадок. Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод о том, что напряжения растут с ростом производительности и времени релаксации напряжений.

На рис.2 показана поверхность первой разности главных напряжений. Хорошо видно, что на линии трехфазного контакта появляется пик напряжения. Перед сечением выхода образуется зона с пониженным значением $\sigma_1 - \sigma_2$. Напомним, что первая разность главных напряжений определяет оптическую неоднородность, а значит и анизотропию физических свойств. Как нам теперь уже известно, в тех местах, где анизотропия максимальна будет максимальной и ориентация макромолекул. А повышенная степень ориентации макромолекул, как уже было сказано выше, может приводить к периодическому проскальзыванию ориентированных участков макромолекул. Вышеизложенное, в свою очередь, говорит о том, что в том месте, где расплав экструдата выходит из формирующей головки непосредственно у стенки, ориентация макромолекул будет максимальной.

Аналогичные результаты получены при использовании реологической модели **Фан-Тьен-Таннера**. Эти данные приведены на рис. 3. На этом рисунке также хорошо видно, что ориентация макромолекул резко увеличивается при приближении к угловой точке выхода из формирующего инструмента. Рост степени ориентации происходит в основном в пристенной области течения расплава. При этом отмечается, что максимальный рост степени ориентации происходит вовсе не вблизи всей пристенной области, а только в довольно узкой зоне течения, располагающейся вблизи выходного сечения. Более того, повышенная степень ориентации макромолекул распространяется и на небольшую область приповерхностного слоя экструдата. Пики напряжений существенно влияют на положение пиков степени ориентации макромолекул.

Вернемся к анализу рис.1 и рис.2 и рассмотрим их еще внимательнее. Если приглядеться, то становится заметно, что перед пиком первой разности главных напряжений наблюдается небольшое снижение значения $(\sigma_1 - \sigma_2)$. Можно сделать вывод о том, что здесь ориентация макромолекул несколько снижается. Этот факт является подтверждением наличия здесь застойной зоны.

Необходимо отметить, что при использовании реологической модели **Фан-Тьен-Таннера** не зафиксировано наличие застойной зоны. Уменьшение ориентации макромолекул, предшествующее пику первой разности главных напряжений, получено благодаря использованию реологического конститутивного соотношения **FENE-P**, которое точнее описывает реологические свойства полимерной жидкости.

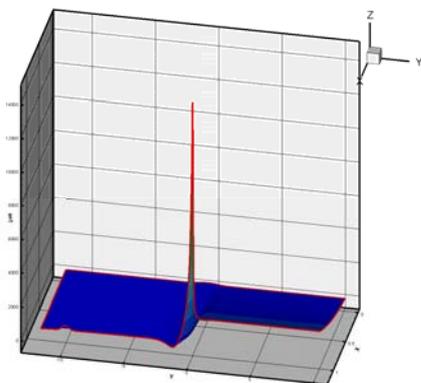


Рис. 2 - Распределение первой разности главных напряжений

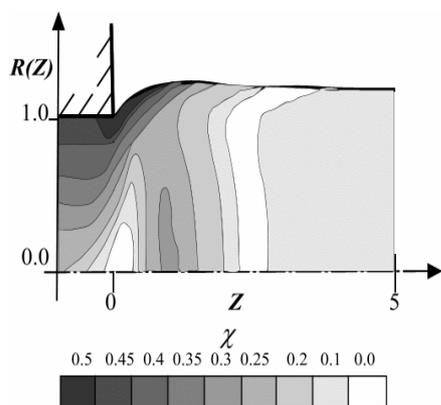


Рис. 3 - Распределение степени ориентации макромолекул в потоке расплава вблизи формирующей головки экструдера

Причины уменьшения первой разности главных напряжений перед ее последующим резким увеличением заключаются в следующем: так как вблизи выходной кромки формирующей головки обра-

зуются структуры с дальним порядком в расположении макромолекул (а именно они и могут являться так называемой застойной зоной), то слой, находящийся перед застойной зоной, будет тормозиться, а затем плавно обтекать ее. Именно поэтому степень ориентации макромолекул в этом месте снижается.

Дальнейший скачок разности главных напряжений говорит о том, что молекулы начинают резко ориентироваться.

Сравним результаты, представленные на рис.1, 2. Полученные нами результаты могут означать следующее: с увеличением значения числа Вайссенберга степень ориентации макромолекул полимера непосредственно вблизи линии 3-х фазного контакта (на выходе из формирующей головки) возрастает. В области, примыкающей к линии 3-х фазного контакта, существуют зона, где происходит уменьшение степени ориентации макромолекул. А это, в свою очередь, говорит о том, что застойная зона, образуемая вблизи выходной кромки насадки, зависит от релаксационных свойств полимерной жидкости. С изменением релаксационных свойств полимера размеры этой зоны также могут изменяться. Причем, если время релаксации макромолекул полимера увеличивается, то увеличивается и застойная зона.

Подытоживая полученные результаты, можно утверждать, что полученные результаты зависят от выбора реологической модели.

Литература

1. Кутузова Г.С., Кутузов А.Г., Кутузова М.А., Тазюков Ф.Х. Течение вязкоупругой жидкости FENE-P в формирующей головке экструдера // Вестник Казанского технологического университета, №21, 2012г., С.145-148.
2. Кутузов А.Г., Кутузов С.А., Кутузова Э.Р. Реологическая модель FENE-P для описания вязкоупругих свойств полимера, перерабатываемого в экструдере// Вестник Казанского технологического университета, №21, 2013г., Т. 16., № 12, С.196-200.
3. Кутузов А.Г. Неизотермическая экструзия полимеров с учетом ориентации макромолекул / А.Г. Кутузов // Каучук и резина. – 2008.-№1. – С.4-6.

© А. Г. Кутузов – д-р техн. наук, проф. каф. автоматизации технологических процессов и производств НХТИ КНИТУ, Kutuzov_Alek@list.ru; С. А. Кутузов – асп. каф. ТМиСМ КНИТУ; Э. Р. Кутузова – асс. каф. АСОИ КНИТУ; М. А. Рузанова – канд. техн. наук, доц. каф. процессов и аппаратов химических технологий НХТИ КНИТУ; Г. С. Кутузова – канд. техн. наук, доц. каф. химии НХТИ КНИТУ.