

В.Г. Савченко, технический директор ООО «Камский кабель»;
А.В. Казаков, старший преподаватель;
Н.М. Труфанова, д-р техн. наук, профессор,
Пермский государственный технический университет

РАСЧЕТ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИИ КАНАЛОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТА КАБЕЛЬНОЙ ГОЛОВКИ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ВИХРЕВЫХ ПОТОКОВ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ИЗОЛЯЦИИ

В процессе производства кабелей среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена возникает необходимость наложения нескольких слоев полимерных материалов. Поочередное наложение каждого слоя за отдельный проход экономически невыгодно и связано с рядом технологических трудностей. Поэтому весь процесс формирования на токопроводящей жиле трех полимерных слоев (экран, изоляция, экран) производится в формирующем инструменте одновременно, с использованием трех экструдеров и кабельной головки сложного профиля. Одной из проблем, возникающих при экструзии, является возможная нестабильность толщины внутреннего электропроводящего слоя, периодически возникающая по периметру кольцевого канала.

В данной статье рассмотрена задача течения и теплообмена расплава полиэтилена в канале кабельной головки при различной конфигурации каналов истечения полимера.

Для упрощения математической модели задача тепло-массообмена рассматривалась в двумерной постановке. Были приняты следующие допущения: процесс стационарный, массовые и инерционные силы пренебрежимо малы, на границах канала задавались условия прилипания и непроникновения, расплав полимера – несжимаемая жидкость, теплофизические характеристики (теплоемкость и теплопроводность) и плотность не зависят от температуры.

Математическая модель процесса теплообмена базировалась на рассмотрении законов сохранения массы, количества движения и энергии [1]. В декартовой системе координат математическая модель представляет собой систему уравнений неразрывности (1), движения (2) и энергии (3, 4), реологическими уравнениями состояния (5, 6), дополненных граничными условиями:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0; \tag{1}$$

$$\rho \left(V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} \right); \tag{2}$$

$$\rho \left(V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right)$$

$$\text{ср} \left(V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \Delta T + q_v; \tag{3}$$

$$q_v = \tau_{xx} \dot{\gamma}_{xx} + \tau_{yy} \dot{\gamma}_{yy} + \tau_{xy} \dot{\gamma}_{xy} + \tau_{yx} \dot{\gamma}_{yx}; \tag{4}$$

$$\tau_{xx} = 2\eta \frac{\partial V_x}{\partial x} = \eta \dot{\gamma}_{xx}; \tau_{yy} = 2\eta \frac{\partial V_y}{\partial y} = \eta \dot{\gamma}_{yy};$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \eta \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) = \eta \dot{\gamma}_{xy}; \tag{5}$$

$$\eta = e^{-\beta T} \mu_0 \left(\frac{I_2}{2} \right)^{\frac{n-1}{2}}, \tag{6}$$

где V_x, V_y – компоненты вектора скорости, τ_{ij} ($i, j = x, y$) – компоненты тензора напряжений, γ_{ij} ($i, j = x, y$) – компоненты тензора скоростей деформации, ρ – плотность полимера, T – температура, p – давление, η – эффективная вязкость, зависящая как от скорости сдвига (степенной закон), так и от температуры (уравнение Рейнольдса), μ_0 – начальная вязкость, I_2 – второй инвариант тензора скоростей деформации, n – показатель аномалии, β – температурный коэффициент вязкости.

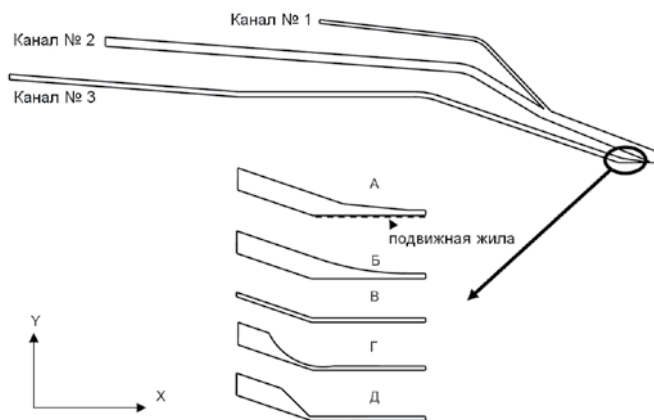


Рис. 1. Варианты конфигурации канала истечения

Течение и теплообмен рассматривались в трех каналах различной формы с общим участком на выходе из кабельной головки (стратифицированное течение). На рис. 1 приведена схема трехканальной кабельной головки и возможные варианты геометрии канала № 3 (вариант А – исходный, Б–Д – расчетные варианты).

В соответствии со сделанными допущениями задавались следующие граничные условия: на твердых неподвижных стенках, образованных дорном и матрицей, согласно условию прилипания и непроникновения скорости равны нулю ($V_x = V_y = 0$); на границе контакта с подвижной жилой – скорость V_x равна линейной скорости движения жилы ($V_y = 0$). Скорость расплава полимера на входе каналов была рассчитана исходя из производительности каждого из трех экструдеров. Граничные условия по температуре были следующие: температура на корпусе $T_k = 443$ К, температура в зоне контакта с жилой определялась температурой предварительного прогрева жилы ($T_{жк} = 383$ К), на входе в канал – температурой полимера на выходе из экструдеров ($T_s = 423$ К). На выходе из кабельной головки задавалось условие свободного истечения (давление равно атмосферному – $P = 100$ кПа) и граничные условия второго рода по температуре и скорости. На границах раздела потоков задавались условия равенства скорости соприкасающихся частиц и равенство векторов напряжений, действующих со стороны соприкасающихся потоков.

В работе в качестве изоляционного материала рассматривался полиэтилен со следующими реологическими и теплофизическими свойствами:

- плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$920,
- вязкость, $\text{Па}/\text{с}$10825,
- теплоемкость, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$2500,
- теплопроводность $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$0,182,
- коэффициент аномалии0,44,
- температурный коэффициент вязкости β , $1/\text{К}$0,007.

Система дифференциальных уравнений (1)–(6), замкнутая граничными условиями, решалась численно с помощью метода конечных элементов с использованием среды инженерных расчетов ANSYS и библиотеки FLOTRAN CFD [3].

В результате решения поставленной задачи были получены поля скоростей, температур и давления. На рис. 2 представлено векторное распределение скоростей расплава для исходной геометрии, на котором отчетливо видна область образования «завихрения» потока полимера, что соответствует участку перехода потока из канала с неподвижными стенками в канал с подвижной стенкой (движущейся жилой). В результате такого режима течения возникает дополнительный диссипативный источник тепла, что, в свою очередь, приводит к существенному (порядка 40 градусов) перегреву полимера. Поле температур для этой же геометрии представлено на рис. 3. Перегрев расплава полимера может являться причиной деструкции материала, что негативно скажется на качестве получаемой продукции.

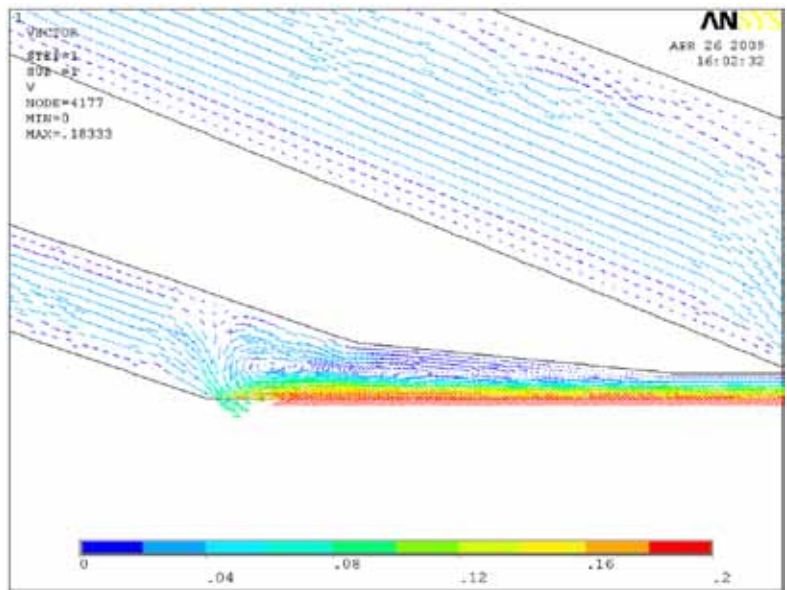


Рис. 2. Векторы скоростей (исходная модель А)

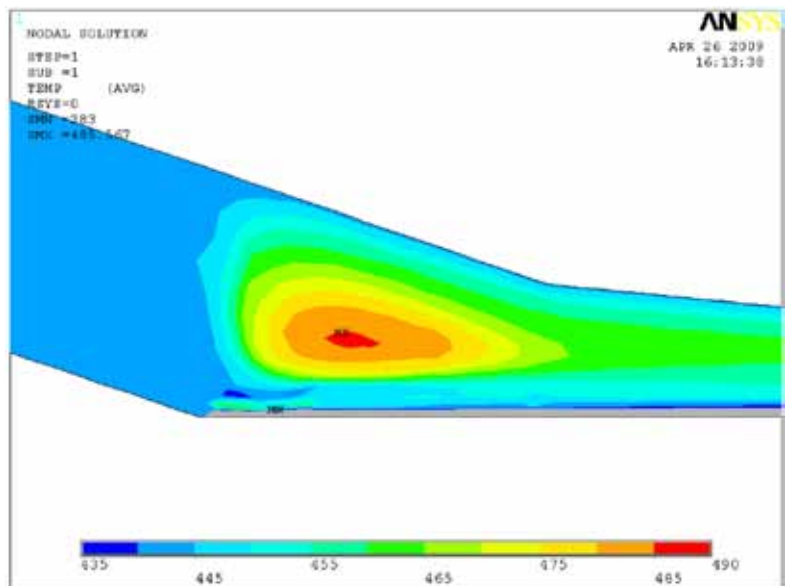


Рис. 3. Распределение температур: локальный перегрев (модель А)

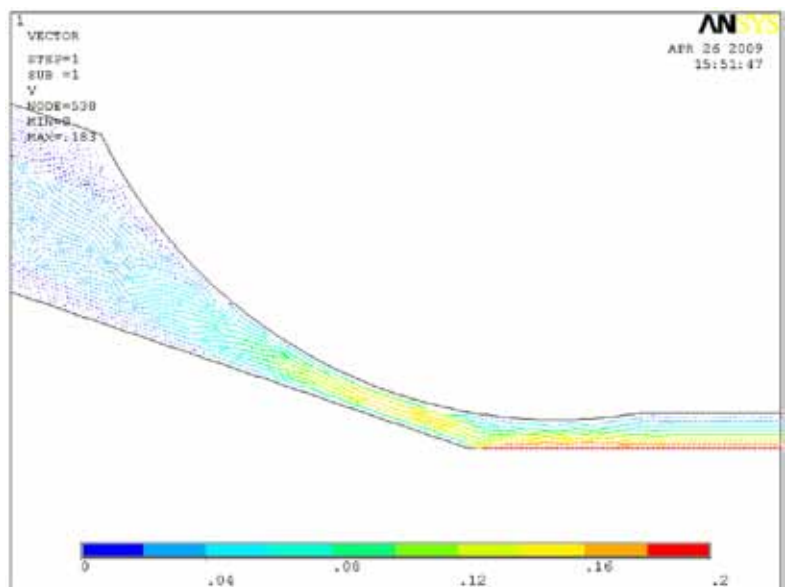


Рис. 4. Векторы скоростей (модель Г)

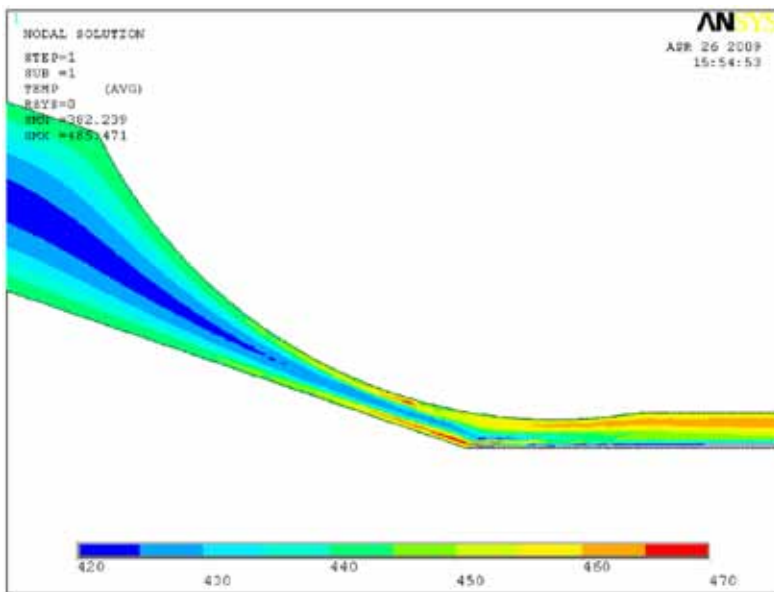


Рис. 5. Распределение температур (модель Г)

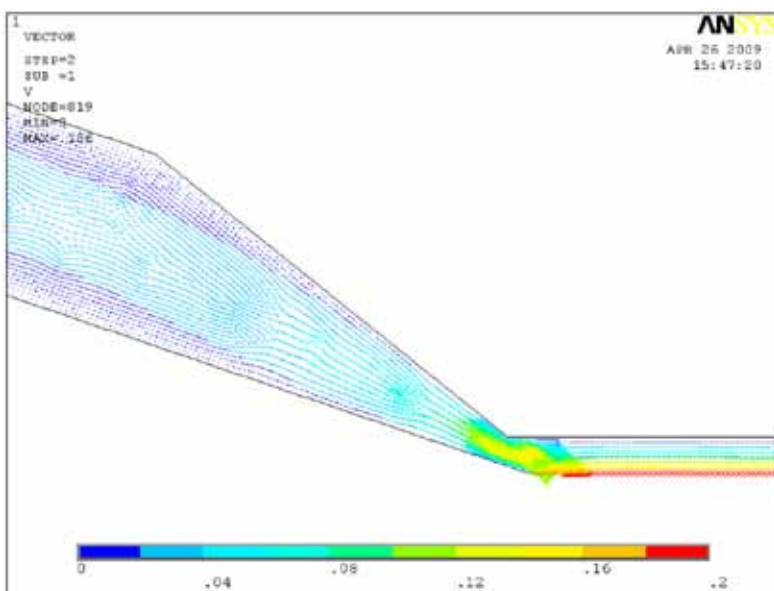


Рис. 6. Векторы скоростей (модель Д)

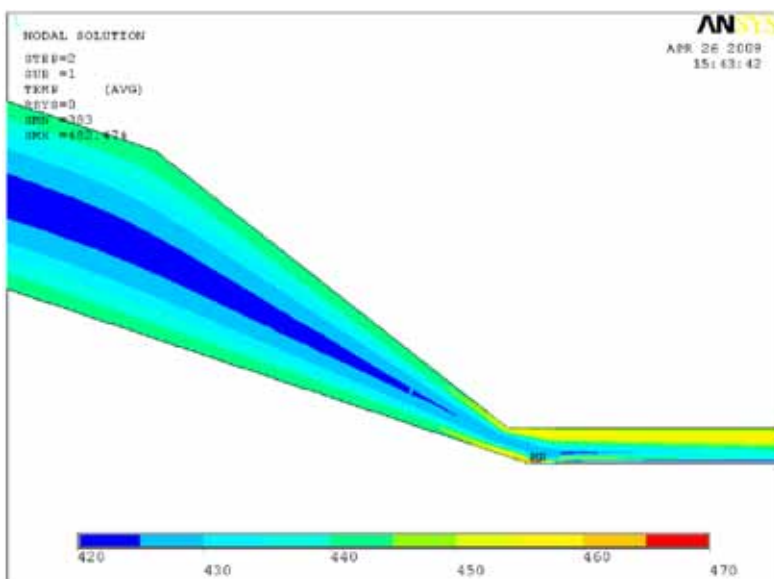


Рис. 7. Распределение температур (модель Д)

В работе были рассмотрены каналы с альтернативной геометрией (рис. 1, Б–Г) с целью устранения участков вихревого течения и, следовательно, возможных перегревов материала.

Варианты расчета процессов теплопереноса с геометрией канала Б, В (рис. 1) привели к результатам аналогичным для исходной геометрии: были отмечены вихреобразные потоки расплава полимера в начальной зоне контакта с подвижной стенкой.

На рис. 4 представлено векторное поле скоростей для канала, геометрия которого соответствует варианту Г (рис. 1). Анализ поля скоростей показал отсутствие области завихрения. Как результат – отсутствуют локальные перегревы расплава полимера (рис. 5), характерные для ранее рассмотренных конфигураций канала истечения.

Однако изготовить кабельную головку с предложенной конфигурацией канала (модель Г) технологически сложно, поэтому был рассмотрен еще один вариант – Д (рис. 1). Такая форма канала для изготовления головки более проста, при этом, аналогично предыдущему варианту, устраняется эффект «завихрения» потока, вызывающий области локального перегрева. Траектории частиц потока и температурные поля для варианта Д показаны на рис. 6 и рис. 7.

Анализ влияния начальной вязкости расплава полимера при изменении уровня консистенции на 25 % показал, что характер течения для рассмотренных вариантов геометрии канала не изменился.

Таким образом, геометрия канала кабельной головки существенным образом влияет на параметры течения полимера. Выбор рациональной геометрии формирующего инструмента позволяет избежать возникновения нежелательных вихрей при течении материала в канале и стабилизировать температурное поле накладываемого полимера. Использование канала с предложенной геометрией может не только улучшить технологичность наложения полимерных слоев, но и повысить качество выпускаемой продукции, снизить затраты на ее изготовление.

Литература

1. Тадмор З. Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос. – М.: Химия, 1984. – 628 с.
2. Раувендааль К. Экструзия полимеров / К. Раувендааль. – СПб.: Профессия, 2008. – 768 с.
3. Казаков А.В. Разработка кабельной головки для производства кабелей с секторными жилами / А.В. Казаков, Н.М. Труфанова // Информационные управляющие системы: сб. науч. трудов – Пермь, 2006.
4. Попов О.А. Моделирование процессов теплопереноса расплава полимера в формирующем инструменте экструзионных аппаратов / О.А. Попов, Н.М. Труфанова // Информационные технологии: сб. ст. – Пермь, 1999.