

УДК 621.315

А.В. КАЗАКОВ, Н.М. ТРУФАНОВА
Пермский государственный технический университет

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРА В КАБЕЛЬНОЙ ГОЛОВКЕ И АНАЛИЗ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ОТ НЕКОТОРЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

В статье приведено численное решение задачи экструзии полимера и оценено влияние начальной вязкости, плотности материала и коэффициента аномалии на температурные поля.

В проводниковой продукции с полимерной изоляцией, как правило, используется не один, а несколько слоев изолирующего материала или полупроводящих экранов, необходимых для выравнивания электрического поля внутри кабеля. Формирование на токопроводящей жиле всех слоев одновременно позволяет сократить накладные расходы при производстве, а также повысить качество проводниковой продукции вследствие уменьшения количества примесей и неоднородностей между слоями изоляции.

В данной статье приведено численное решение задачи тепломассообмена в кабельной головке улучшенной конструкции, конфигурация которой позволяет реализовать безвихревое течение расплава полиэтилена, улучшающего свойства готового изделия [1, 2].

Для ряда изоляционных материалов необходимым условием качества получаемой продукции является сохранение температуры расплава полимера в диапазоне 170–180 градусов Цельсия. При превышении температуры 180 градусов происходит деструкция материала.

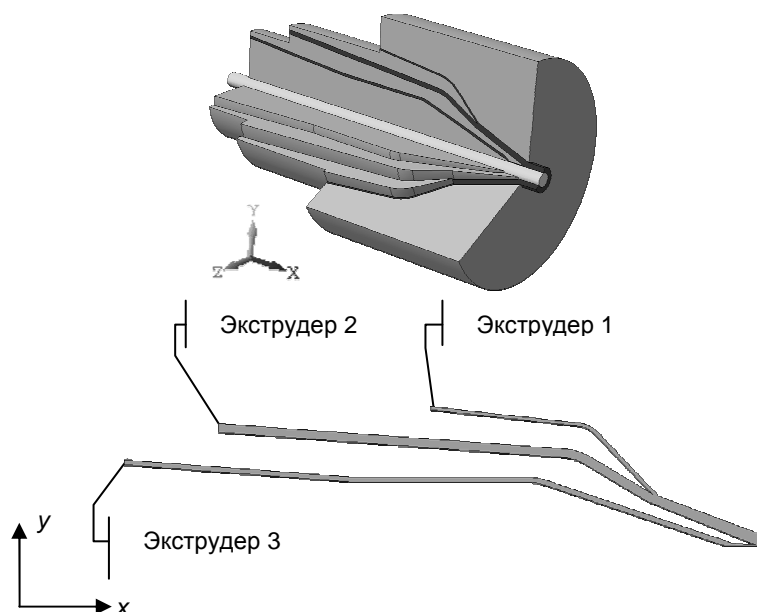


Рис. 1. Геометрия канала истечения

Для того чтобы оценить применимость геометрии канала истечения для материалов с различными реологическими и теплофизическими характеристиками, были проведены исследования зависимостей средней температуры на выходе от начальной вязкости материала (μ_0), плотности материала (ρ), показателя аномалии (n) и температурного коэффициента вязкости (β).

В работе были приняты следующие допущения: процесс стационарный, массовые силы пренебрежимо малы, на границах канала, образованных формулирующим инструментом, задаются условия прилипания и непроникновения, расплав полимера несжимаем, теплофизические характеристики постоянны. Задача рассматривалась в двумерной постановке.

Общий вид каналов истечения представлен на рис. 1.

Математическая модель основана на законах сохранения массы, количества движения и энергии [3] и представляет собой систему уравнений неразрывности (1), движения (2), энергии (3) и реологических уравнений состояния (4), дополненных граничными условиями.

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

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

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

$$c\rho \left(V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \Delta T + q_v, \quad (3)$$

$$q_v = \Phi_{xx} \dot{\gamma}_{xx} + \Phi_{yy} \dot{\gamma}_{yy} + \Phi_{xy} \dot{\gamma}_{xy} + \Phi_{yx} \dot{\gamma}_{yx},$$

$$\tau_{xx} = 2z \frac{\partial V_x}{\partial x} = 3\tau_{xx}, \quad \tau_{yy} = 2z \frac{\partial V_y}{\partial y} = 3\tau_{yy}, \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = z \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right) = 3\tau_{xy}, \quad (4)$$

$$z = e^{-\beta T} M_0 \left(\frac{I_2}{2} \right)^{\frac{n-1}{2}}, \quad (5)$$

где η – эффективная вязкость, зависящая как от скорости сдвига (степенной закон), так и от температуры (уравнение Рейнольдса) (5), V_x , V_y – x и y компоненты вектора скорости, $\tau_{i,j}$ ($i, j = x, y$) – компоненты тензора напряжений, $\dot{\gamma}_{i,j}$ ($i, j = x, y$) – компоненты тензора скоростей деформации, ρ – плотность полимера, T – температура, p – давление, μ_0 – начальная вязкость, I_2 – второй инвариант тензора скоростей деформации, n – показатель аномалии, β – температурный коэффициент вязкости.

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 и задавалась в виде прямоугольной эпюры. Температура на корпусе $T_k = 443$ К, температура в зоне контакта с жилой определялась температурой предварительного прогрева жилы ($T_{ж} = 383$ К), на входе в канал – температурой полимера на выходе из экструдеров ($T_3 = 423$ К). На выходе 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.

Реологические и теплофизические характеристики материала, использовавшиеся при расчете, представлены в таблице.

Свойства материала

Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$	550–900
Вязкость, $\text{Па}/\text{с}$	7000–13000
Коэффициент аномалии	0,1–0,7
Теплоемкость, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$	2500
Теплопроводность $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$	0,182
Температурный коэффициент вязкости β , $1/\text{К}$	0,007

Задача течения и теплообмена расплава материала решалась численно при помощи метода конечных элементов с использованием среды инженерных расчетов ANSYS с библиотекой FLOTTRAN CFD и h -метода решения [4]. Для разбиения модели на конечные элементы был использован элемент FLUID141, позволяющий рассчитывать поля скоростей, температур и давления в заданной области и оперирующий такими свойствами материала, как плотность, вязкость, теплоемкость и теплопроводность. Всего было порядка 20 тысяч узлов и 18 тысяч элементов. Часть сетки разбиения модели представлена на рис. 2.

В результате решения поставленной задачи были получены поля температур, скоростей, вязкости и давления.

На рис. 3 приведена зависимость продольной компоненты скорости V_x от коэффициента аномалии вязкости n . При увеличении n в семь раз (от 0,1 до 0,7) увеличивался противоток расплава полимера, что приводило к незначительному уменьшению расхода.

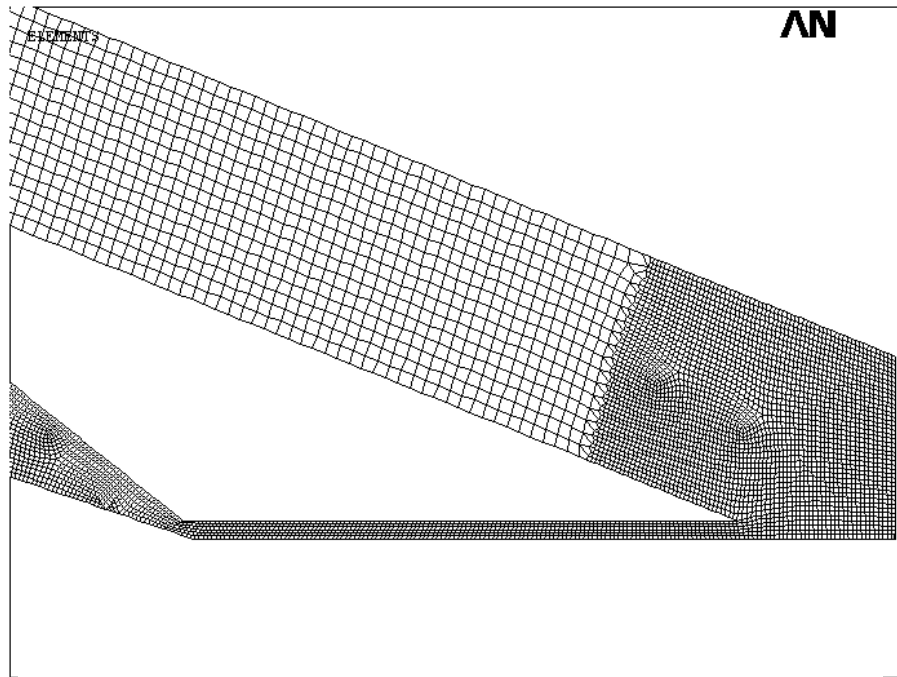


Рис. 2. Сетка разбиения

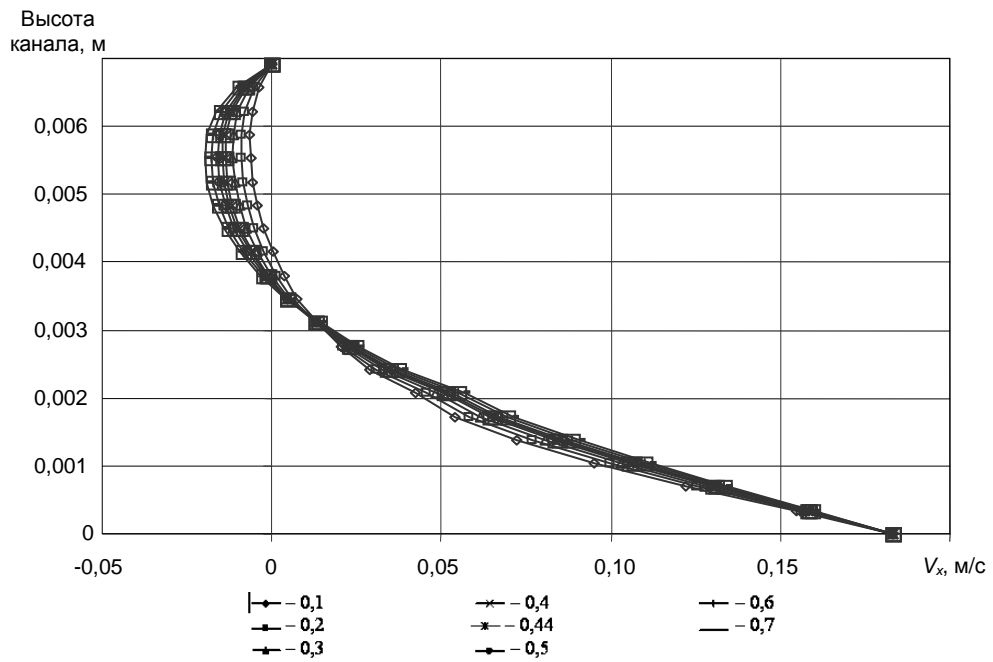


Рис. 3. Распределения V_x , на выходе для различных n

Изменение температуры в нижней части потока экструдера 2 при изменении коэффициента аномалии вязкости не превышало 4°C (рис. 4).

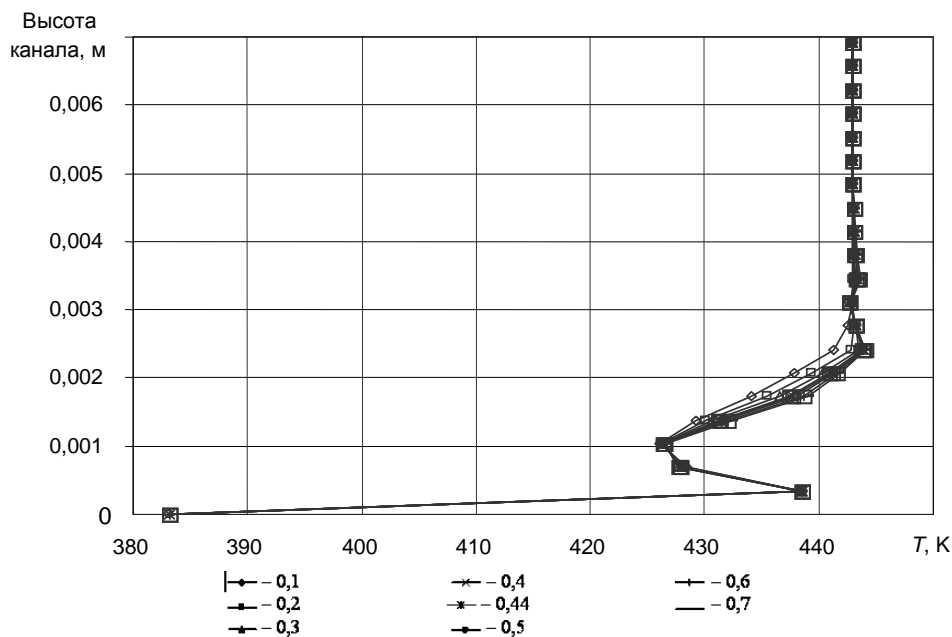


Рис. 4. Распределения температуры T на выходе для различных n

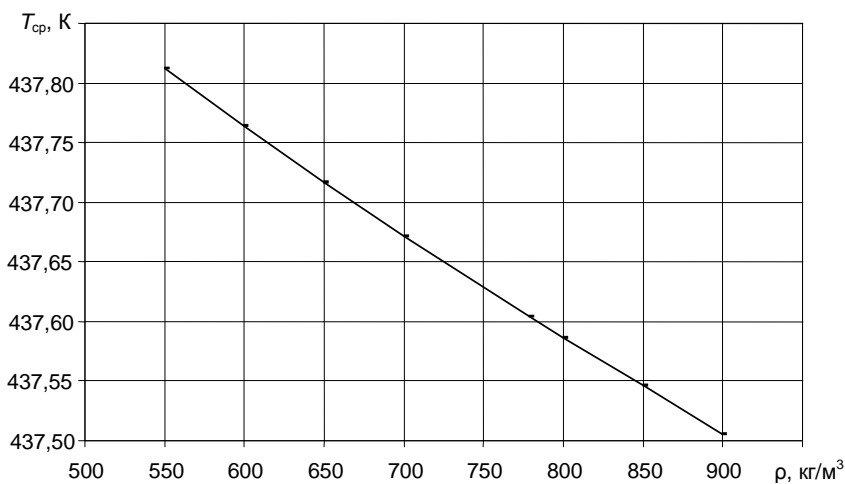


Рис. 5. Зависимость средней температуры на выходе $T_{ср}$ от плотности материала ρ

На рис. 5 показана зависимость средней температуры на выходе из канала от плотности материала (ρ). Увеличение плотности от 550 до 900 кг/м³ приводило к уменьшению средней температуры на выходе расчетной области. Максимальная разница средней температуры при этом составила порядка 0,3 градуса.

Увеличение начальной вязкости (μ_0) в диапазоне от 7000 до 9000 Па/с приводило к увеличению средней температуры на выходе, а при дальнейшем увеличении вязкости от 9000 до 13000 Па/с средняя температура не меняется (рис. 6). Однако, учитывая диапазон изменения средней температуры (0,05 градуса), зависимость средней температуры от начальной вязкости можно пренебречь.

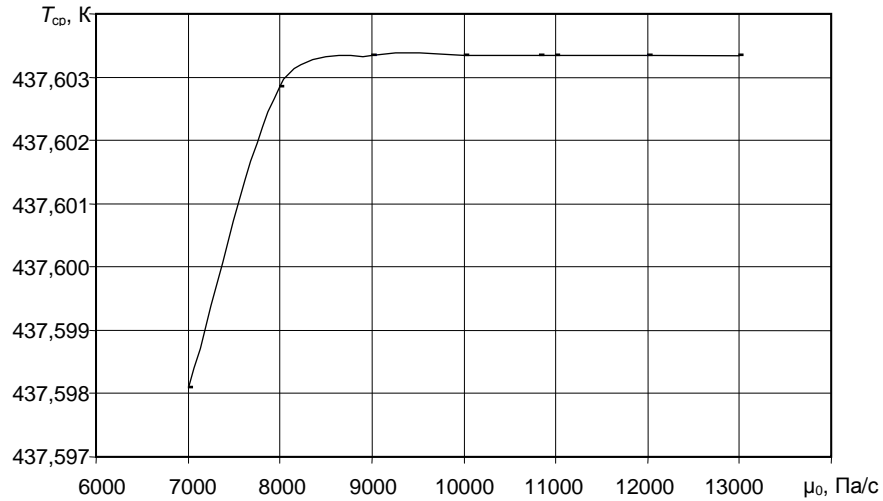


Рис. 6. Зависимость средней температуры на выходе $T_{ср}$ от вязкости μ_0

На рис. 7 представлена зависимость средней температуры на выходе от коэффициента аномалии (n). При увеличении n в семь раз (от 0,1 до 0,7) средняя температура на выходе возросла на 0,8 градуса.

Изменение температурного коэффициента вязкости β от 0,001 до 0,013 выявило увеличение средней температуры на выходе (рис.8) на 0,35 градуса.

Таким образом, исследование показало, что наиболее существенное влияние на процесс теплообмена оказывает величина коэффициента аномалии вязкости n .

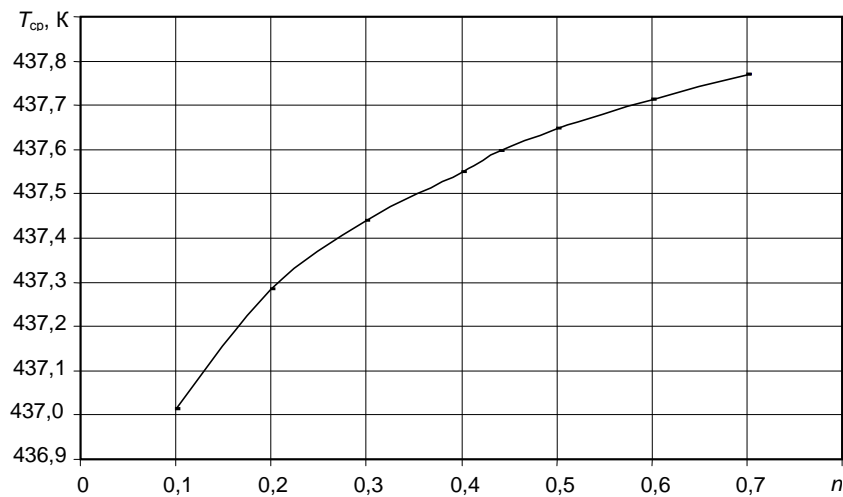


Рис. 7. Зависимость средней температуры на выходе $T_{ср}$ от показателя аномалии n

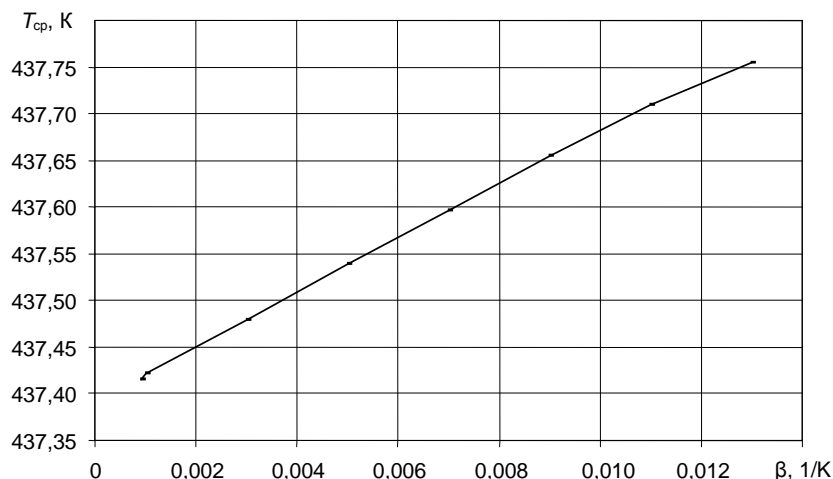


Рис. 8. Зависимость средней температуры на выходе $T_{ср}$ от температурного коэффициента вязкости β

Поскольку во всех случаях средняя температура на выходе менялась незначительно (максимальный перепад не превышает один градус), можно сделать вывод о целесообразности использования предложенной ранее геометрии не только для исследуемого материала (сшиваемый полиэтилен низкой плотности), но и для материалов с характеристиками, отличающимися от заданных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казаков А.В., Труфанова Н.М. Сравнение процессов тепломассопереноса при экструзии полимерной изоляции в производстве кабелей для различных расчетных моделей // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: матер. Краев. науч.-техн. конф. – Пермь, 2008. – С. 153–157.
2. Казаков А.В., Труфанова Н.М. Моделирование процесса тепломассопереноса при разработке кабельной головки для кабелей с секторными жилами // Зимняя школа по механике сплошных сред: сб. ст. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007.
3. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 628 с.
4. Попов О.А., Труфанова Н.М. Моделирование процессов тепломассопереноса расплава полимера в формирующем инструменте экструзионных аппаратов // Информационные технологии: сб. ст. – Пермь, 1999.

Получено 01.05.2009.