

Введение В работе [3] рассматривались установившееся течение и теплообмен неньютоновской жидкости в коаксиальном канале бесконечной длины, со сформировавшимся профилем температуры. На практике чаще всего наблюдается изменение профиля температуры по длине, и в связи с этим наибольший интерес представляет исследование влияния основных безразмерных параметров на условия возникновения критических режимов теплообмена в канале с учетом изменения температуры по длине и по радиусу. В данном случае численная реализация поставленных задач усложняется в силу того, что необходимо учитывать конвективный теплоперенос, особенности изменяющегося неньютоновского характера поведения среды, убывание концентраций при условии химической реакции полимеризации, поэтому в литературе можно встретить небольшое количество работ по данной тематике. Исследование распределений температуры и компонент вектора скорости на начальном участке коаксиального канала в зависимости от интенсивности химического и диссипативного источников при условии преобладания одного из них были рассмотрены в [4]. Исследования этих характеристик проведены и от некоторых других основных определяющих параметров в [5].

1. Постановка задачи При построении математической модели стационарного теплообмена при течении неньютоновской жидкости в коаксиальном реакторе, как и в [4], приняты следующие допущения: течение ламинарное, осесимметричное, стационарное; теплофизические характеристики жидкости, такие как плотность, теплопроводность и теплоемкость меняются незначительно; силы тяжести входят в уравнения неявно через избыточное давление; перенос тепла вдоль основного направления движения за счет теплопроводности много меньше вынужденного в этом же направлении; профиль скорости почти мгновенно подстраивается под профиль температуры (); присутствует химический источник теплоты, распределенный по всему объему канала, заданный реакцией дробного порядка. На границе задаются гидродинамические условия прилипания, тепловые и концентрационные граничные условия первого рода. При сделанных допущениях и некоторых преобразованиях решаемая система уравнений в цилиндрической системе координат будет выглядеть следующим образом: (1) где , и . В этих уравнениях , - тепловой эффект химической реакции; - константа скорости химической реакции; - энергия активации химической реакции; - коэффициент температуропроводности; - динамическая вязкость; - плотность жидкости; - универсальная газовая постоянная; - удельная изобарная теплоемкость; - удельная молярная теплоемкость; - температура; - компоненты вектора скорости ; - давление; - соответственно внутренний и внешний радиусы коаксиального канала; - длина канала, - константа скорости реакции инициирования, - энергия активации процесса инициирования, - плотность жидкости, - универсальная газовая постоянная, - концентрация мономера, - концентрация инициатора, -

коэффициенты взаимной диффузии мономера и инициатора. Вторым инвариантом тензора скоростей деформации представлено выражением (2). Для системы уравнений (1) граничные условия задаются в виде 1., 2. (3) 3. где T - температура окружающей среды, T_0 - температура на входе в коаксиальный канал. На входе в канал профиль компоненты вектора скорости (то есть функция $v_z(r)$) является решением задачи (4), при этом τ_{rz} , а составляющая градиента давления в направлении оси определяется из выражения (5) где Q - расход жидкости через поперечное сечение канала. В качестве реологической модели используется модель Кутателадзе-Хабахпашевой [1] для неньютоновской жидкости, подробно описанная в [4]. Для приведения системы уравнений (1) к безразмерному виду используются те же обозначения что и в [2],[4]: τ , η , μ , ν , λ , β , γ , δ , ϵ , ζ , η , θ - реологические параметры; n - число Аррениуса из уравнения для инициатора, τ_0 - нормированная по длине концентрация инициатора; τ_1 - нормированная по длине концентрация мономера; μ - коэффициент динамической вязкости; ν , безразмерный параметр Франк-Каменецкого характеризующие интенсивность химического источника тепловыделения; λ - безразмерные параметры Франк-Каменецкого характеризующие интенсивность массовыделения в результате химической реакции; β - безразмерный параметр, характеризующий интенсивность тепловыделения от вязкого течения; γ , δ - безразмерные параметры связывающие расход и длину канала; ϵ - безразмерный параметр, число Аррениуса; ζ - параметр отношения энергии активации вязкого течения к энергии активации химической реакции; η - безразмерный параметр соотношения радиуса и длины коаксиального канала, θ - безразмерный параметр, отвечающий за геометрию канала. Приведя вязкость, как и в [4], к безразмерному виду, получим (6), (7), (8). Подставляя (6) в (1) и переходя к безразмерным параметрам, как и в [4], имеем (9). После перехода к безразмерным параметрам граничные условия первого рода (3) примут вид: 1., 2., (10) 3., Для решения системы уравнений (9) с граничными условиями (10) используется тот же итерационный алгоритм, что и в [4]. Он включает в себя решение соответствующих трехточечных разностных уравнений методом прогонки с пересчетом всех коэффициентов уравнений, зависящих от искомым функций. Вследствие нелинейности системы уравнений (9) и неявного вида функции вязкости были введены дополнительные итерации по вязкости и по нелинейному свободному члену. Необходимая точность вычислений значений определяемых параметров задаётся величиной ϵ , с которой на каждом слое по координате сравнивается относительное среднеквадратическое отклонение значений определяемых параметров предыдущей и последующей итераций. Численное исследование и результаты Рассмотрим распределение логарифма температуры на рис 1. Как видно на рисунке, резкое возрастание температуры при начинается при τ_0 . Значения исходных безразмерных параметров для расчетов приведены в [5], при этом τ_1 . На рис. 2-3 представлены распределения компонент скорости v_z и τ_{rz} . Как следует из литературы [5], авторы (исследования

которых приписывают к исследованиям классической теории теплового взрыва) рассматривали в основном задачи о критическом теплообмене в сосуде, поэтому вопросы, связанные с гидродинамикой процесса были второстепенны.

Существует также и некоторое количество классических работ по исследованию теплообмена в каналах, реакторах и других проточных системах [6-7]. В этих задачах не учитывалось взаимное влияние тепловых и гидродинамических полей, и основные результаты в них представляются в виде распределений по объему температуры, степени превращения и вязкости [7]. Однако, при рассмотрении процессов в проточных системах, решение задачи о критическом режиме теплообмена должно включать в себя также учет взаимного влияния гидродинамических и тепловых характеристик процесса. Рис. 1 - Распределение логарифма температуры по длине и по радиусу при критическом значении параметра На рис. 2 хорошо видна деформация профиля продольной скорости по координате, это связано с тем, что по мере увеличения происходит рост вязкости за счет роста степени превращения у стенок реактора. За счет этого происходит деформация профиля, значения становятся меньше у стенок и больше в центре межстеночной области канала. В критической области реакция полимеризации сильно ускоряется, и рост вязкости за счет превращения вещества подавляет ее уменьшение за счет интенсивно растущей температуры в пристеночных областях. В начале предкритической области профиль скорости почти параболический, далее в критической области он становится уже не параболическим. Рис. 2 - Распределение компоненты скорости по длине и по радиусу реактора при критическом значении параметра Изменение профиля продольной компоненты скорости по длине оказывает влияние на изменение по длине профиля поперечной компоненты вектора скорости. В пристеночных слоях из-за уменьшения скорости по, скорость растет по, а ближе к центру уменьшается. Таким образом, существующий конвективный теплоперенос в поперечном направлении вследствие влияния температуры на вязкость становится наиболее ярко выраженным по мере увеличения координаты при условии критического режима теплообмена в реакторе. Наблюдаемая на рис. 2-3 асимметрия профилей скорости и определяется значением параметра. Величина компоненты по сравнению с существенна в предкритической области, поэтому нельзя пренебрегать компонентой скорости, когда речь идет о критических режимах теплообмена. Рис. 3 - Распределение компоненты скорости по длине и по радиусу при критическом значении параметра Рис 2-3 показывают, что при постоянном расходе реагентов в реакторе и для данных рассмотренных определяющих параметрах происходит лишь уменьшение скорости у стенок и ее увеличение в центре межстеночного пространства. Распределения полей температур существенно зависят от распределения полей концентраций реагентов в реакторе. Как следует из приведенного на рис. 4 полного распределения, концентрации мономера и инициатора убывают с ростом

координаты, при этом убывание инициатора более медленное, чем мономера для заданных значений Re и Da . На практике, конечно, чаще всего инициатор расходуется быстрее, чем мономер, но рассматриваемый здесь случай также встречается. В критической области происходит сильное изменение концентрации инициатора по r в центре межстеночной области канала, так как температура там резко повышается и скорость реакции увеличивается. То же самое наблюдается для концентрации мономера. Рис. 4 - Распределение концентрации мономера по длине и по радиусу при критическом значении параметра B в предкритической и критической областях рассмотренные распределения кардинально изменяются. В предкритической области концентрация максимальна в центральной области канала, так как время пребывания мономера у стенок канала больше, чем в центре межстеночной области канала. Далее по мере увеличения температуры возрастает в центре канала (в области максимума концентраций) в силу меньших значений радиального теплового потока в этой области по сравнению с выделившимся в ходе реакции теплом, скорость реакции там увеличивается, становится большей, чем в пристеночных слоях. Далее максимум концентрации делится на два максимума которые перемещаются к пристеночным слоям. При рассмотрении полного распределения логарифма динамической вязкости видно, что профиль вязкости сильно зависит от профиля температуры. Рассматривая полное распределение, отметим, что в пристеночных областях температура не столь существенно влияет на $\ln \eta$ по сравнению со степенью превращения. Проведенные исследования показывают, что профиль вязкости по длине канала существенно изменяется, что объясняется влиянием на величину трех факторов: температуры, второго инварианта и степени превращения. Заключение

Предложена математическая модель течения обобщенной ньютоновской жидкости в реакторе коаксиального типа при совместном действии химического и диссипативного источников тепловыделения, и проведен анализ результатов численных исследований, полученных на основании этой модели. В силу специфичности свойств неньютоновской жидкости, в режимах, близких к критическим, было обнаружено изменение по длине профиля как продольной, так и поперечной компонент скорости жидкости. Как показали расчеты, при предкритическом режиме теплообмена поперечная скорость жидкости при $r=0$ (то есть, в центре межстеночной области коаксиального канала) близка к нулю. Динамическая вязкость жидкости сильно зависит от температуры, однако в режимах, близких к критическим, также наблюдается и влияние на нее градиента скорости. Наряду с аналогичными распределениями характеристик в [5], распределения определяемых характеристик по длине при различных значениях параметра дают ясную картину о процессах, происходящих в условиях критического режима теплообмена при течении неньютоновской жидкости в коаксиальном канале.