

Сведения о выполненных работах в 2019 году
по проекту «**Разработка средств моделирования и исследования течений
высоковязких неньютоновских жидкостей с целью прогнозирования
технологических режимов переработки высокоэнергетических полимерных
композиций**», поддержанному Российским научным фондом
Соглашение № 18-19-00021

Руководитель Шрагер д-р физ.-мат. наук Геннадий Рафаилович

Проект направлен на решение фундаментальной проблемы физико-химической гидродинамики, связанной с моделированием неизотермических течений неньютоновских сред, в том числе при наличии свободной поверхности и движущейся линии трехфазного контакта, применительно к технологии переработки высокоэнергетических полимерных композиций методом литья.

В результате реализации второго этапа настоящего проекта были сформулированы математические постановки задач о течениях вязкопластичной жидкости Балкли–Гершеля в трубах с внезапным сужением или расширением, а также с препятствием, частично перекрывающим сечение трубы. Сформулированы также математические постановки задач о течениях вязкопластичной жидкости Балкли–Гершеля со свободной поверхностью в процессе заполнения вертикально расположенных плоского канала и круглой трубы в неизотермических условиях. Сформулирована математическая постановка задачи о стационарном неизотермическом течении вязкопластичной жидкости в плоском канале/круглой трубе с заданным постоянным расходом с учетом вязкой диссипации и зависимости реологических характеристик среды от температуры в одномерном приближении. Реализована модель формирования кристаллизационного слоя на стенках круглой трубы для изотермического течения неньютоновской жидкости, позволяющая получить аналитическое выражение для определения толщины слоя. На основе конечно-разностного подхода численного решения дифференциальных уравнений разработаны алгоритмы расчета рассматриваемых двумерных течений, созданы программы их реализации на ЭВМ. Реализован алгоритм расчета пространственного течения вязкой жидкости на основе VOF–метода, осуществляемого при заполнении вертикально расположенного канала прямоугольного сечения. Разработана оригинальная методика определения формы и местоположения свободной поверхности, допускающая использование произвольно ориентированных плоскостей внутри контрольного объема, что повышает точность расчета ориентации элементов свободной поверхности в пространстве. Для реализации алгоритма расчета создана программа для ЭВМ. Проведена верификация созданных средств математического моделирования на известных решениях, а также сравнением полученных результатов с экспериментальными и расчетными данными других авторов. Выполнены параметрические исследования рассматриваемых течений.

Проведены параметрические расчеты течений в трубах с внезапным расширением или сужением с целью анализа структуры потока и характеристик течения в зависимости от значений определяющих параметров. Структура потока вязкопластичной жидкости включает зоны квазитвердого движения, зоны сдвигового течения и застойную зону в окрестности внутреннего угла. Квазитвердые ядра образуются в областях малых скоростей деформаций в широкой и узкой частях трубы. С ростом числа Бингама наблюдается увеличение размеров квазитвердых ядер и застойной зоны. Вблизи входной и выходной границ трубы реализуются одномерные течения, характерные для установившегося движения вязкопластичной жидкости в бесконечной трубе постоянного радиуса. В окрестности скачка сечения формируются участки двумерного течения. Для количественного анализа структуры потока вводится безразмерная длина зон двумерного течения до и после скачка сечения, а также безразмерная ширина квазитвердых ядер в широкой и узкой частях трубы. В результате параметрических расчетов получены зависимости геометрических характеристик потока от значений чисел Рейнольдса и Бингама для разных значений отношения диаметров стыкуемых труб. Выполнен расчет местных гидравлических сопротивлений. Результаты расчетов согласуются с имеющимися экспериментальными и расчетными данными других авторов. Для течения неньютоновской жидкости в трубе с препятствием проведены параметрические расчеты течений псевдопластичных и дилатантных жидкостей с целью исследования влияния основных определяющих параметров на структуру потока и характеристики течения. Получены зависимости геометрических характеристик структуры потока, распределений вихря, скоростей, эффективной вязкости, давления, напряжений от числа Рейнольдса, коэффициента нелинейности реологического поведения жидкости, степени перекрытия сечения трубы. Результаты расчетов согласуются с имеющимися экспериментальными и расчетными данными других авторов. Для течения вязкопластичной жидкости в Т-образном канале проведены расчеты с целью анализа формирования структуры и направления потока в зависимости от значений определяющих параметров. Структура потока характеризуется наличием квазитвердых ядер, величина и местоположение которых в потоке существенно зависит от величин перепадов давления между сечениями протекания. Построенная ранее диаграмма режимов течения степенной жидкости претерпевает качественное изменение в зависимости от значения числа Бингама.

Проведены параметрические расчеты неизотермических течений вязкопластичной жидкости при заполнении емкостей с целью анализа влияния вязкой диссипации и зависимости реологических параметров от температуры на структуру потоков и характеристики течений для разных значений определяющих параметров. Наряду с разнообразием структур потоков, наблюдаемых в изотермических условиях, учет неизотермичности приводит к качественному изменению структуры потока вязкопластичной жидкости при заполнении каналов. При определенных значениях безразмерных параметров реализуется режим с формированием «замерзшего» слоя на твердой стенке. Результаты расчетов для изотермического случая согласуются с имеющимися экспериментальными и расчетными данными других авторов.

В результате вычислительного эксперимента выявлены различные структуры неизотермического течения вязкопластичной жидкости в плоском канале/круглой трубе с заданным постоянным расходом с учетом вязкой диссипации и зависимости реологических характеристик среды от температуры, характеризующиеся образованием квазитвердого ядра в окрестности линии/оси симметрии и застойной зоны около твердой стенки. Проведены исследования влияния определяющих параметров на структуру потока. Получены характерные распределения скорости, температуры, эффективной вязкости и диссипативной функции в сечении канала/трубы, значения числа Нуссельта при разных значениях параметров, определяющих степень влияния вязкой диссипации и зависимости реологических характеристик от температуры, числа Бингама и показателя нелинейности реологической модели.

Расчетные формы свободной поверхности при пространственном заполнении канала с прямоугольным сечением согласуются с данными, полученными методом граничных элементов и представленными в книге Шрагер Г.Р., Козлобродов А.Н., Якутенок В.А. Моделирование гидродинамических процессов в технологии переработки полимерных материалов. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1999. 230 с. Расчеты пространственного заполнения подтверждают картину течения, наблюдаемую для двумерных течений. Область течения при заполнении можно разделить на две зоны: зона одномерного течения вдали от свободной поверхности; пространственное течение в окрестности свободной поверхности. Профиль продольной скорости, полученный в зоне одномерного течения на квадратной сетке $1/40$, практически совпадает с соответствующим аналитическим решением. Отклонения расчетных значений от аналитического решения не превышают 0.1 %.