

Сведения о выполненных работах в 2020 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 Геннадий Рафаилович, д-р физ.-мат. наук

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 третьего этапа настоящего проекта были сформулированы математические постановки задач о неизотермическом течении жидкости Оствальда – де Ваале в осесимметричном коаксиальном зазоре с учетом вязкой диссипации и зависимости эффективной вязкости от температуры с граничными условиями первого рода на внешней твердой стенке и условиями второго рода на внутренней стенке для температуры и о неизотермическом течении реологически сложной жидкости в трубе с учетом процесса кристаллизации и вязкой диссипации, зависимости реологических свойств среды от температуры и глубины кристаллизации. Сформулирована также математическая постановка задачи о неизотермическом течении неньютоновской жидкости со свободной поверхностью, реализуемом при заполнении вертикально расположенных плоского канала и круглой трубы в поле силы тяжести, направленной против потока, с учетом процесса кристаллизации и вязкой диссипации, зависимости эффективной вязкости от температуры и степени кристаллизации.

С использованием программ для ЭВМ, созданных на предыдущих этапах проекта, выполнены исследования течений неньютоновской жидкости в трубах с сужением и расширением, в Т-образном канале, а также в трубе с препятствием, частично перекрывающим сечение трубы в изотермических условиях. Проведены параметрические исследования рассматриваемых течений с целью определения структуры потоков, их кинематических и динамических характеристик в широком диапазоне изменения определяющих параметров. Получены критериальные зависимости для величин местных гидравлических сопротивлений в трубах со скачком сечения, в трубе с препятствием, частично перекрывающим сечение канала, в диапазоне изменения значения числа Рейнольдса $1 \leq Re \leq 100$, значения числа Бингама $0 \leq Bn \leq 10$, значения показателя нелинейности в реологическом законе Балкли–Гершеля $0,6 \leq n \leq 1,6$ для различных значений степени сужения и перекрытия сечения трубы.

Проведены параметрические исследования неизотермических течений вязкопластичной жидкости в трубах со скачком сечения с целью определения

структуры потоков, их кинематических и динамических характеристик в широком диапазоне изменения определяющих параметров. Получены критериальные зависимости для величин местных гидравлических сопротивлений в диапазонах изменения определяющих критериев: значения числа Рейнольдса $1 \leq Re \leq 100$; значения числа Бингама $0 \leq Bn \leq 10$; значения числа Бринкмана $0,5 \leq Br \leq 4$; значения показателя нелинейности в реологическом законе Балкли – Гершеля $0,6 \leq n \leq 1,6$; для числа Пекле равного 100 при различных значениях степени сужения. Выполнена оценка влияния неизотермичности на характеристики течения и значения местных гидравлических сопротивлений.

Проведены параметрические исследования неизотермического течения жидкости Оствальда – де Ваале в осесимметричном коаксиальном зазоре с учетом вязкой диссипации и зависимости эффективной вязкости от температуры с граничными условиями первого рода на внешней твердой стенке и условиями второго рода на внутренней стенке для температуры с целью определения кинематических и динамических характеристик потока, распределений числа Нуссельта в широком диапазоне изменения определяющих параметров. В зависимости от значений определяющих параметров существует критическое значение перепада давления, выше которого стационарного решения не существует, то есть тепло, генерируемое за счет вязкой диссипации, не успевает отводиться из трубы через стенки и реализуется явление, названное в литературе гидродинамическим тепловым взрывом. В области значений перепада давления меньше критического возможно существования двух режимов: низкотемпературный и высокотемпературный.

Разработан алгоритм численного решения задачи о неизотермическом течении реологически сложной жидкости в трубе с учетом процесса кристаллизации и вязкой диссипации, зависимости реологических свойств жидкости от температуры и глубины кристаллизации и создана программа его реализации на ЭВМ. Получены результаты параметрических исследований кинематических и динамических характеристик потока полипропилена, температурных полей, степени кристаллизации и толщины закристаллизовавшегося слоя на стенке трубы в зависимости от времени для разных значений расхода на входе в трубу и для различных значений температуры твердой стенки. Результаты расчетов согласуются с имеющимися экспериментальными данными.

Разработан численный алгоритм решения задачи о неизотермическом течении неньютоновской жидкости со свободной поверхностью, реализуемом при заполнении вертикально расположенных плоского канала и круглой трубы в поле силы тяжести, направленной против потока с учетом процесса кристаллизации и вязкой диссипации, зависимости эффективной вязкости от температуры и степени кристаллизации с использованием метода контрольного объема, алгоритма SIMPLE и метода инвариантов для удовлетворения граничных условий на свободной поверхности. Создана программа его реализации на ЭВМ. Выполнено численное исследование течения жидкого полипропилена в процессе заполнения круглой трубы с использованием сформулированной модели. Получена эволюция свободной поверхности, поля температуры и степени кристаллизации с течением времени для

заданных функций физических характеристик среды от температуры, степени кристаллизации и условий реализации течения. Проиллюстрировано формирование закристаллизовавшегося слоя на твердой стенке и изменение его размеров с течением времени.

С использованием математической формулировки задачи, алгоритма расчета и программы его реализации на ЭВМ, разработанных на втором этапе проекта, выполнены исследования пространственного заполнения вертикального канала прямоугольного сечения вязкой жидкостью в поле силы тяжести в случаях, когда жидкость подается под давлением в нижнем сечении канала и жидкость падает в канал сверху в виде струи. Получены поля скоростей, давления, эволюция свободной поверхности и ее формы в зависимости от изменения числа $W = Re/Fr$, равного отношению чисел Рейнольдса и Фруда и характеризующего отношение гравитационных и вязких сил в потоке, в диапазоне $0 \leq W \leq 100$ при малых числах Re . Определены размеры зон установившегося плоского движения и фонтанирующего течения жидкости в окрестности свободной поверхности для заполнения канала квадратного сечения в зависимости от значений определяющих параметров. Установлены условия устойчивости падающей струи при заполнении емкости сверху.