

Сведения о выполненных работах в 2018 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 д-р физ.-мат. наук Шрагер 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 первого этапа настоящего проекта были сформулированы математические модели течений вязкой, степенной и вязкопластичной жидкостей со свободной поверхностью, реализуемых при заполнении плоского канала и круглой трубы в изотермических и неизотермических условиях. Сформулированные математические модели описывают капиллярные эффекты на свободной границе, различные способы задания граничных условий на движущейся линии трехфазного контакта (жидкость-газ-твердое тело) с целью устранения сингулярности традиционной постановки задачи со свободной поверхностью при наличии движущейся линии трехфазного контакта, учитывают вязкую диссипацию, кинетику превращения и зависимость реологических характеристик жидкой среды от температуры и глубины превращения. Сформулированы также математические модели напорных течений жидкости в трубопроводах с различными конструктивными элементами специального назначения (соединения типа сужение/расширение, шаровый затвор, устройство разделения потока), учитывающие неньютоновское поведение жидкой среды, вязкую диссипацию, зависимость реологических характеристик от температуры и различные условия взаимодействия жидкости с твердой стенкой. На основе конечно-разностного подхода численного решения дифференциальных уравнений разработаны алгоритмы расчета рассматриваемых двумерных течений, созданы программы их реализации на ЭВМ. Разработан алгоритм расчета пространственных течений вязкой жидкости со свободной поверхностью с использованием VOF/PLIC-метода и создана программа расчета. 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.

Параметрические исследования влияния значений капиллярного числа и равновесного краевого угла на форму свободной поверхности при заполнении круглой трубы вязкой жидкостью показывают, что с усилением капиллярного

эффекта форма поверхности стремится к сферической, а динамический краевой угол к равновесному. Решение задачи о заполнении плоского канала вязкой жидкостью в поле силы тяжести в предположении движения линии контакта с динамическим краевым углом равным  $180$  градусам реализовано с использованием четырех вариантов движения точки контакта, предполагающих выполнение условия прилипания и скольжения в контактной точке и накатывание свободной поверхности на твердую стенку. Анализ влияния предложенных режимов движения на распределения кинематических и динамических характеристик в окрестности контактной линии показывает, что кинематические характеристики и эволюция свободной поверхности слабо зависят от способа реализации динамики линии трехфазного контакта. Сингулярность поведения динамических характеристик, присущая традиционной модели гидродинамики, локализуется в малой окрестности точки контакта и практически не влияет на их распределения в основном потоке. Сингулярность в распределении напряжений устраняется при использовании условия проскальзывания. Показано, что при слабом влиянии гравитационных сил основной вклад в движении контактной линии вносит накатывание, а с их ростом начинает доминировать скольжение, при этом значение краевого угла остается близким к  $180$  градусам.

Проведены параметрические расчеты стационарных неизотермических течений степенной жидкости в трубе с внезапным сужением (расширением) с учетом вязкой диссипации и зависимости эффективной вязкости от температуры, а также возможности скольжения жидкости на твердой стенке при умеренных значениях чисел Рейнольдса, Пекле, Бринкмана и значениях параметра нелинейности реологической модели, обуславливающих псевдопластичное и дилатантное поведение жидкой среды для различных величин отношения диаметров стыкуемых труб. Получены зависимости геометрических характеристик структуры потока (размеры областей двумерного течения, циркуляционной зоны) от значений определяющих параметров. Установлено, что размеры области двумерного течения вверх и вниз по потоку от скачка сечения существенно зависят от показателя нелинейности. Характер влияния чисел Рейнольдса, Пекле и Бринкмана совпадает с таковым для ньютоновской жидкости. Получены распределения составляющих скорости, вязкости и температуры. Исследовано влияние неизотермичности и неньютоновости на значения местных гидравлических сопротивлений. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными и расчетными данными других авторов.

Параметрические расчеты стационарного течения степенной жидкости в Т-канале позволили выделить четыре режима течения в зависимости от заданных перепадов давления между сечениями протекания. В первом режиме жидкость втекает через сечение центральной ветви канала, а вытекает через сечения боковых ветвей с последующим запиранием одной из боковых ветвей. Во втором режиме жидкость втекает через сечение центральной и одной из боковых ветвей канала. Третий режим характеризуется одной входной границей на боковой ветви и двумя выходными границами в сечениях центральной и другой боковой ветви. В четвертом режиме жидкость втекает через сечения боковых ветвей и вытекает через центральную ветвь

канала. Получены распределения скорости, давления и вязкости для разных режимов течения в зависимости от значений определяющих параметров. Построена диаграмма режимов течения в плоскости давлений в сечениях протекания боковых ветвей канала для жидкостей разной реологии. Результаты расчетов согласуются с данными других авторов.

Проведены параметрические расчеты неизотермических течений степенной жидкости, реализуемых при заполнении вертикально расположенных плоского канала и круглой трубы при малых значениях числа Рейнольдса для изменяющихся значений чисел Пекле и Бринкмана, показателя нелинейности реологической модели, критерия, характеризующего отношение гравитационных и вязких сил в потоке. Качественное поведение характеристик плоского и осесимметричного течений в зависимости от значений определяющих параметров согласуется, имеются лишь количественные отличия. При заполнении вертикальных емкостей против силы тяжести с заданным расходом на входе устанавливается выпуклая форма свободной поверхности, которая движется вдоль канала со среднерасходной скоростью. При этом в потоке формируются две характерные зоны: зона фонтанирующего течения в окрестности свободной поверхности и область одномерного течения вдали от нее. В отсутствии массовых сил для изотермического случая форма свободной поверхности слабо зависит от показателя нелинейности реологической модели. С увеличением роли гравитационных сил выпуклость свободной границы уменьшается и этот эффект усиливается для псевдопластичной жидкости. Получены результаты, характеризующие кинематику течений для изотермического случая, демонстрируется влияние вязкой диссипации и зависимости вязкости от температуры на распределения искомых величин. Установлены режимы неустойчивого заполнения при малых значениях показателя нелинейности реологической модели степенной жидкости. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными и расчетными данными других авторов.

В результате проведенного исследования изотермического заполнения вертикально расположенной круглой трубы вязкопластичной жидкостью Балкли-Гершеля при малом значении числа Рейнольдса продемонстрировано разделение потока жидкости на зону двумерного течения в окрестности свободной границы и одномерное течение вдали от нее. Зависимости безразмерной длины зоны двумерного течения от числа Бингама при различных значениях критерия, характеризующего отношение гравитационных и вязких сил в потоке, демонстрируют рост длины зоны двумерного течения с увеличением параметра пластичности. Получены зависимости формы свободной границы от соотношения гравитационных и вязких сил в потоке и значений параметров реологической модели. Наблюдается рост выпуклости свободной границы с уменьшением показателя нелинейности и с увеличением параметра пластичности. Структура течения вязкопластичной среды характеризуется наличием квазитвердых ядер в потоке и, значения реологических параметров существенно влияют на ее формирование. Продемонстрированы характерные структуры течения: с одним квазитвердым ядром на достаточном удалении от свободной поверхности; с двумя ядрами, в окрестности свободной границы и вдали

от нее; с объединенным ядром. Показаны случаи стабильного и нестабильного заполнения в зависимости от значений определяющих параметров. Результаты расчетов согласуются с расчетными данными других авторов.

В отличие от первоначального варианта технологии реализации VOF/PLIC-метода, в разработанном алгоритме расчета пространственных течений вязкой жидкости со свободной поверхностью для определения давления используется SIMPLE-процедура. Предлагается оригинальный способ расчета характеристик течения в приграничных к твердой стенке ячейках, частично заполненных жидкостью. Для проверки работоспособности созданной программы выполнены расчеты течения вязкой жидкости при плоском заполнении вертикальной прямоугольной емкости с центральным телом в струйном или пленочном режимах, а также проведено численное исследование устойчивости падающей струи при взаимодействии с горизонтальной твердой стенкой в плоской постановке. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с результатами других авторов, полученными методом граничных элементов, а также с экспериментальными данными.