

Сведения о выполненных работах в 2021 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.

За отчетный период была сформулирована математическая модель неизотермического течения реологически сложной жидкости в трубе с центральным телом с учетом вязкой диссипации, зависимости реологических свойств от температуры и глубины отверждения при наличии свободной поверхности. Решена задача о течении термореактивной полимерной жидкости при заполнении плоского канала с учетом процесса отверждения. В результате проведенных исследований получены распределения кинематических и теплофизических характеристик потока и степени химического превращения с течением времени. Расчетные данные согласуются с имеющимися в литературе экспериментальными данными.

В ходе исследования процесса отверждения эпоксидной смолы получено распределение температуры и степени отверждения с течением времени в зависимости от температуры горячей границы. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными.

Сформулирована математическая модель неизотермических течений неньютоновских жидкостей в трубе со скачком сечения с учетом вязкой диссипации, химического превращения, зависимости реологических характеристик среды от температуры и глубины превращения с граничными условиями смешанного типа для теплообмена на твердой стенке. Разработан алгоритм численной реализации сформулированной математической модели и созданы программы расчета для ЭВМ.

Проведены исследования структуры неизотермических потоков в трубе с резким сужением, с граничными условиями смешанного типа для теплообмена на твердой стенке. Длины участков твердой стенки с заданными адиабатическими условиями для широкой и узкой частей трубы являются параметрами задачи. Параметрические расчеты выполнены для разных значений чисел Рейнольдса, Пекле, Бринкмана: $1 \leq Re \leq 100$, $100 \leq Pe \leq 1000$, $1 \leq Br \leq 5$ и значений параметра нелинейности реологической модели $0.8 \leq n \leq 1.2$. Получены распределения линий тока, скорости и температуры и реализовано их сравнение в двух рассмотренных случаях граничных условий для температуры: условия первого рода; условия смешанного типа. Показано

преимущество использования граничных условий для температуры смешанного типа с точки зрения местных потерь давления.

Выполнено исследование стационарного течения несжимаемой степенной жидкости в круглой трубе с резким расширением в изотермической постановке. Параметрические расчеты выполнены для $0.1 \leq Re \leq 100$, отношения радиусов широкой и узкой частей трубы $1.25 \leq \beta \leq 4$ и $0.5 \leq n \leq 1.5$.

Получены картины течений, изменения геометрических характеристик структуры потока и местных потерь давления в зависимости от параметров задачи. Критериальные зависимости показали, что с ростом таких параметров, как степень расширения трубы, показатель нелинейности жидкости, местные потери давления увеличиваются, а с ростом числа Рейнольдса, наоборот, уменьшаются.

Сформулирована математическая модель течения неньютоновской жидкости со свободной поверхностью во входном узле емкости с центральным телом. Разработан алгоритм численной реализации сформулированной математической модели на основе VOF/PLIC - метода и создана программа расчета для ЭВМ. Параметрические исследования выполнены для ньютоновской жидкости в следующем диапазоне определяющих параметров: $0.001 \leq Re \leq 10$; $0 \leq W \leq 20$. В результате расчетов выявлены различные режимы формирования потока во входном узле в зависимости от значений параметров:

- режим заполнения, когда свободная поверхность полностью перекрывает границы зазора между скачком сечения и центральным телом и непрерывно растекается по дну ёмкости. Такой режим реализуется при доминировании гравитационных сил над вязкими и инерционными силами;

- режим заполнения, при котором струя жидкости, ударяясь о центральное тело, падает на дно ёмкости. Наблюдается, когда вязкие силы уступают инерционным эффектам, но доминируют над гравитационными силами;

- режим заполнения, для которого характерно натекание жидкости на центральное тело без обрушения на дно с образованием боковых струй. Реализуется при сильном доминировании вязких сил над гравитационными силами.

Построена диаграмма распределения режимов в зависимости от числа Рейнольдса и параметра W для течения жидкости во входном узле.

Разработан алгоритм расчета пространственных течений несжимаемой неньютоновской жидкости со свободной поверхностью на основе модификации VOF/PLIC - метода, использующей произвольно ориентированные плоскости внутри контрольного объема для определения формы свободной поверхности, что повышает точность расчета ориентации элементов свободной поверхности в пространстве. Создана программа реализации алгоритма на ЭВМ. Проведена верификация разработанного алгоритма и программы его реализации при рассмотрении течения степенной жидкости в процессе заполнения вертикальной прямоугольной емкости с центральным телом в струйном или пленочном режимах в поле силы тяжести, реализуемого в технологии свободного литья.

Параметрические исследования проводились для ньютоновской, дилатантной и псевдопластичной жидкостей в диапазоне чисел Рейнольдса $0 < Re \leq 20$, значений параметра W , характеризующего соотношение гравитационных и вязких сил в потоке, $0 < W \leq 20$ и значений параметра нелинейности реологической модели $0.8 \leq n \leq 1.2$. В результате продемонстрированы четыре режима заполнения ёмкости. Исследован характер массораспределения жидкости внутри ёмкости. Проведен анализ деформации элементов жидкости в процессе заполнения.

Проведены исследования изотермических течений псевдопластичной, дилатантной, вязкопластичной жидкостей со свободной поверхностью в процессе заполнения трубы с центральным телом без учета отверждения. Параметрические исследования проводились при значении $Re = 0.1$, значений параметра W , характеризующего соотношение гравитационных и вязких сил в потоке, в диапазоне $1 \leq W \leq 30$, значений числа Бингама $0 \leq Bn \leq 5$ и значений отношения радиусов внутреннего и внешнего цилиндров $0.1 \leq \alpha \leq 0.5$.

Получены поля кинематических характеристик потока. Представлены распределения линий тока и областей квазитвердого движения, характеризующие структуру потока. Выявлены режимы течения с одним, двумя и объединенным квазитвёрдыми ядрами. Построены топограммы массораспределения порций жидкости в заполненном жидкостью пространстве.

Выполнено исследование неизотермического течения неньютоновской жидкости со свободной поверхностью в процессе заполнения трубы с центральным телом без учета отверждения с использованием реологической модели WLF (Williams–Landel–Ferry). Демонстрируется влияние параметров, характеризующих соотношение гравитационных и вязких сил и степень зависимости вязкости от температуры на распределения кинематических и динамических характеристик потока, эффективной вязкости, температуры, а также на форму свободной поверхности.