

Сведения о выполненных работах в 2016 году
по проекту «**Экспериментально-теоретическое исследование процессов
динамического взаимодействия консолидированной системы частиц дисперсной
фазы в двухфазных потоках**»,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 15-19-10014

Руководитель д-р физ.-мат. наук Архипов Владимир Афанасьевич

В отчетном 2016 году выполнен весь объем запланированных работ и получен ряд новых научных результатов по процессу потери устойчивости формы и дробления деформируемых частиц дисперсной фазы при различных режимах движения.

Проведен аналитический обзор результатов теоретических и экспериментальных исследований по закономерностям деформации и дробления деформируемых частиц дисперсной фазы (капель и пузырьков) в двухфазном потоке. Аналитический обзор по тематике работ 2016 года показал, что опубликованные в настоящее время в научной литературе сведения требуют дальнейшего обобщения и анализа с привлечением результатов дополнительных экспериментальных исследований в более широких диапазонах определяющих процесс параметров.

Проведены патентные исследования с целью определения достигнутого технического уровня разработанных способов и устройств для экспериментального исследования процессов деформации и дробления деформируемых частиц дисперсной фазы в условиях обдувающего потока. Разработаны два принципиально новых устройства для экспериментального исследования деформации капель в потоке воздуха с контролируемой постоянной скоростью обдува капли – на основе двухракурсной скоростной видеосъемки падающей сферической капли во встречном потоке воздуха и видеорегистрации неподвижной капли, образующейся на срезе капилляра, при обдуве равномерным потоком воздуха.

С использованием разработанных в рамках проекта устройств и имеющихся установок, основанных на гравитационном осаждении частиц дисперсной фазы, проведены экспериментальные исследования потери устойчивости формы капли. Анализ результатов экспериментов по потере устойчивости формы капли показал, что процесс и механизм деформации капли определяется режимом обтекания и скоростью дисперсионной среды, в которой движется частица. Для случая движения капли в неподвижной среде под действием силы тяжести деформация капли начинается при числах Рейнольдса $Re > 95$; при $Re \leq 95$ капля сохраняет сферическую форму в процессе движения. В экспериментах с обдувом капель потоком воздуха выявлены три области чисел Рейнольдса, разделяющие механизм потери устойчивости: а) при $Re = 0.01-250$ наблюдается неустойчивость Рэлея-Тейлора; б) при $Re = 500-1400$ устанавливается переходный режим движения капли, при котором в процессе ее движения происходит смена механизма деформации от

неустойчивости Рэлея-Тейлора к неустойчивости Кельвина-Гельмгольца; в) при $Re > 1500$ реализуется неустойчивость Кельвина-Гельмгольца.

Проведены патентные исследования по способам и устройствам для исследования структуры двухфазного потока с применением оптико-электронных устройств измерения параметров дисперсных сред. Разработано принципиально новое устройство, основанное на измерении оптической плотности факела при лазерном сканировании по хордам в заданном сечении с последующим решением соответствующей обратной задачи оптики аэрозолей. С использованием разработанного сканирующего устройства проведено экспериментальное исследование структуры факела распыла и определены радиальные распределения концентрации капель для нескольких типов форсунок. По результатам экспериментов получены аппроксимационные зависимости для радиального распределения массовой концентрации капель. Обнаружено, что для центробежной форсунки максимальная концентрация капель достигается на границе факела распыла, а для эжекционных форсунок – на оси симметрии. По мере удаления от среза сопла концентрация капель постепенно выравнивается по сечению факела.

Получены критериальные эмпирические зависимости для основных характеристик процесса потери устойчивости формы капель (или пузырьков) – степени деформации, критические значения чисел Вебера и Бонда, соответствующие началу потери устойчивости формы капли (или пузырька) по механизмам Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тейлора. Получены критериальные уравнения для комплексного учета аэродинамического и инерционного механизмов деформации капель, включающие числа Вебера и Бонда в диапазонах $We = 1-20$, $Bo = 1-90$. Получены аппроксимационные зависимости для радиального распределения массовой концентрации капель в факеле распыла форсунок разного типа $C_m(r, h)$, где r – радиальная координата, h – расстояние от среза сопла форсунки, при варьировании геометрических и расходных характеристик форсунок. Полученные экспериментальные зависимости были использованы при верификации физико-математических моделей рассматриваемых процессов.

Разработаны модифицированные физико-математические модели процесса потери устойчивости и дробления капель и пузырьков с учетом полученных критериальных соотношений. Сформулирована математическая модель деформации одиночной капли в потоке, как гидрогазодинамического процесса при наличии подвижной поверхности раздела. Модель позволяет получать стационарное решение при условии его существования, а также определить развитие процесса дробления с привлечением дополнительного алгоритма определения условий устойчивости формы равновесной деформированной капли. Разработан алгоритм расчета рассматриваемого гидродинамического процесса на базе конечно-разностного метода.

Разработаны физико-математическая модель и алгоритм расчета неравновесного двухфазного течения в сопле Лаваля твердотопливного ракетного двигателя в рамках квазиодномерной постановки. В разработанную модель включены полученные при

выполнении проекта, а также наиболее адекватные литературные данные по критериальным соотношениям для учета процессов деформации и дробления частиц, а также зависимость для параметра коагуляции и дробления частиц при взаимных столкновениях.

Разработана физико-математическая модель процесса распыливания жидкости эжекционной форсункой. В данной модели расчет поля течения распыливающего газа в канале форсунки и в факеле распыла проводится в рамках осесимметричной постановки с использованием пакета Ansys Fluent. Траектории капель рассчитываются с использованием уравнений движения частиц в заданном поле газа. Данная модель позволяет полностью описать структуру факела распыла, а также характеристики дисперсности капель.

На основе предложенных физико-математических моделей проведены параметрические расчеты и анализ полученных результатов применительно к рассматриваемым процессам – деформации капли (или пузырька), неравновесного двухфазного течения, содержащего расплавленные частицы оксида алюминия, в сопле Лавалья твердотопливного ракетного двигателя и распыливания жидкостей центробежной и эжекционной форсунками. Проанализированы картины течения при обтекании сферической капли и деформированной капли в форме сплюснутого сфероида для различных значений определяющих параметров. Показано, что влияние дробления частиц оказывает существенное влияние на удельный импульс тяги при значениях начального модального диаметра частиц оксида алюминия более 1 мкм. Детализирована структура факела распыла и дисперсный состав образующихся капель в зависимости от геометрических и режимных характеристик форсунок.

По результатам решения поставленных задач проекта в 2016 г. оформлены и направлены в Роспатент три заявки на получение патентов РФ и одно заявление на получение Свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.