

Сведения о выполненных работах в 2017 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 2017 году выполнен весь объем запланированных работ и получен ряд новых научных результатов по процессам динамического взаимодействия консолидированной системы частиц дисперсной фазы в двухфазных потоках.

Проведен аналитический обзор результатов теоретических и экспериментальных исследований по закономерностям движения одиночных деформируемых частиц дисперсной фазы (капель или пузырьков) в присутствии поверхностно-активного вещества (ПАВ). Проведены патентные исследования, объектом которых являлись способы и устройства для исследования закономерностей движения деформируемых частиц дисперсной фазы, в том числе, в присутствии ПАВ. Разработаны два устройства для получения кластера пузырьков (системы равномерно распределенных в объеме жидкости пузырьков). Оба устройства работают по принципу аэратора импульсного действия.

Проведены экспериментальные исследования процесса всплытия одиночного пузырька воздуха и кластера пузырьков (системы равномерно распределенных в объеме жидкости пузырьков) в присутствии ПАВ в широком диапазоне числа Рейнольдса $Re=0.001-30$. Проведено свыше 200 серий экспериментов для начальной объемной концентрации группы пузырьков до 0.06 и массовой концентрации ПАВ в жидкости 0.01-1%. Экспериментально рассмотрены два вида всплытия группы пузырьков: контактное взаимодействие и бесконтактное взаимодействие. При анализе экспериментальных данных рассмотрены две модели распределения ПАВ на поверхности пузырька – модель «затвердевшей кормовой части» и модель «полного затвердевания», отличающиеся концентрацией добавки в жидкости. В экспериментах исследовано влияние размера пузырька, объемной концентрации группы пузырьков, содержания и природы поверхностно-активного вещества в жидкости на динамику всплытия пузырьков. Исследовано влияние содержания ПАВ в жидкости на форму пузырька и скорость его всплытия. Проведен анализ влияния числа Рейнольдса на скорость (коэффициент сопротивления) всплытия пузырьков в присутствии поверхностно-активного вещества. Проведено обобщение полученных экспериментальных результатов исследования процесса всплытия одиночного пузырька воздуха и системы пузырьков в жидкости при наличии ПАВ различной концентрации.

Получены новые экспериментальные данные по закономерностям движения одиночного пузырька и системы равномерно распределенных в объеме жидкости пузырьков в присутствии ПАВ в диапазоне числа Рейнольдса $Re=0.001-30$. Показано, что для пузырька постоянного диаметра до достижения критической концентрации мицеллообразования его скорость нелинейно уменьшается по мере увеличения концентрации добавки, а после прекращения процесса мицеллообразования скорость пузырька остается постоянной. Экспериментально обнаружено, что существует некоторое критическое значение концентрации ПАВ в жидкости, начиная с которого происходит смена режима движения пузырька, при этом это критическое значение концентрации является функцией размера пузырька (с увеличением размера пузырька значение критической концентрации возрастает). Обнаружено, что влияние поверхностно-активного вещества на динамику всплытия пузырька определяется значением числа Рейнольдса Re . При $Re < 1$ смена режима всплытия пузырька происходит при меньшей концентрации ПАВ, чем при $Re > 1$. Получена эмпирическая зависимость для коэффициента сопротивления группы пузырьков в присутствии поверхностно-активного вещества в области числа Рейнольдса $Re < 1$, $Cd=18.8/Re$ (с коэффициентом детерминации 0.99). Обнаружено уменьшение скорости всплытия группы пузырьков в жидкости, содержащей ПАВ, по сравнению со скоростью движения системы пузырьков в чистой жидкости. При этом влияние поверхностно-активного вещества на динамику движения системы пузырьков для конкретной пары жидкость – ПАВ определяется содержанием ПАВ в жидкости и размером пузырьков.

Сформулирована физико-математическая модель движения сферической частицы в стационарном потоке дисперсионной среды в присутствии поверхностно-активного вещества на основе уравнений Навье-Стокса. Получено операционным методом аналитическое решение задачи о нестационарном движении капли и пузырька в поле силы тяжести в вязкой среде при малых числах Рейнольдса с учетом влияния поверхностно-активного вещества на касательные напряжения на поверхности частицы дисперсной фазы. Для приближенных оценок получено асимптотическое разложение для зависимости скорости движения частицы от времени.

Проведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных зависимостей скорости всплытия пузырька в стационарных и нестационарных условиях в жидкости, содержащей поверхностно-активное вещество. Проведены параметрические расчеты скорости движения пузырька в диапазоне чисел Рейнольдса $Re=0.001-1$ в вязкой жидкости с учетом изменения коэффициента торможения за счет действия поверхностно-активного вещества.

С учетом результатов проведенных экспериментов разработана полуэмпирическая физико-математическая модель движения кластера частиц в дисперсионной среде в присутствии поверхностно-активного вещества в поле силы тяжести. Проведены параметрические расчеты движения кластера пузырьков, движущихся в присутствии

поверхностно-активного вещества, при этом концентрация ПАВ варьировалась в диапазоне 0.01-1%, диаметр пузырьков – 2-5 мм.

Сформулирована расширенная физико-математическая модель движения жидко-капельного аэрозоля в атмосфере с учетом большинства определяющих параметров. Модель описывает гравитационное осаждение полидисперсного ансамбля капель с учетом аэродинамического сопротивления, ветровой нагрузки, процессов конвективного теплообмена и испарения капель, деформации капель за счет потери устойчивости по механизмам Кельвина-Гельмогольца и Рэля-Тейлора, дробления капель при достижении критических значений чисел Бонда и Вебера, а также процессы коагуляции и дробления при взаимных столкновениях капель разных размеров. В расширенной физико-математической модели учтены полученные в рамках выполнения проекта экспериментальные зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от объемной концентрации частиц в консолидированном ансамбле жидко-капельного аэрозоля. Для расширения диапазона чисел Био (при движении аэрозольных частиц с низким значением коэффициента теплопроводности) снято допущение об осреднении температуры капли по ее объему. Тепловое состояние капли описывается нестационарным уравнением теплопроводности в сферической системе координат с соответствующими начальными и граничными условиями.

Разработан алгоритм для расчета процесса распространения жидко-капельного облака в атмосфере в зависимости от сезонно-климатических и реальных метеорологических условий конкретных регионов России, с учетом температурного распределения воздушной массы по высоте, а также направления и скорости воздушного потока на разных высотах.

Разработан алгоритм расчета параметров кристаллизации жидких частиц алюминия в осадительной камере эжекционной форсунки. Физико-математическая модель процесса базируется на описании процесса взаимодействия пленки расплава с кольцевой струей распыливающего газа в выходном сечении эжекционной форсунки, где образуется поток полидисперсных капель алюминия.

Проведена адаптация физико-математической модели газодинамического распыливания жидкости применительно к процессу распыливания расплава алюминия в технологии получения высокодисперсных порошков алюминия марок АСД. Дополнительно учтены процессы кристаллизации частиц алюминия в факеле распыла эжекционной форсунки и в осадительной камере для сбора первичного порошка алюминия (пультверизата).

Проведен сравнительный анализ полученных результатов экспериментальных и теоретических исследований процесса всплытия пузырьков в присутствии поверхностно-активного вещества с известными литературными данными в пересекающихся диапазонах параметров.

Разработаны рекомендации по возможности использования результатов работы по проекту в реальном секторе экономики, в частности, в усовершенствовании применяемой в настоящее время технологии получения высокодисперсных порошков металлов методом газодинамического диспергирования струи расплава эжекционной форсункой и в повышении эффективности проведения оценочных работ по определению степени загрязнения окружающей среды в районах аварийного сброса авиационного топлива.

По результатам решения поставленных задач Проекта оформлены и направлены в ФИПС две заявки на изобретения и два заявления на получение Свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.