

Сведения о выполненных работах и полученных научных результатах
в период с 29.07.2022 г. по 30.06.2023 г.

по проекту **«Влияние поверхностно-активного вещества на динамику движения консолидированной системы деформируемых частиц дисперсной фазы в двухфазном потоке»**,

поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 22-79-10028

Руководитель: Усанина Анна Сергеевна, канд. физ.-мат. наук

Для экспериментального исследования процесса всплытия консолидированной системы монодисперсных пузырьков в присутствии и в отсутствие поверхностно-активного вещества (ПАВ) в жидкости разработан новый способ получения кластера монодисперсных пузырьков (Заявка № 2023107999 от 31.03.2023 на выдачу патента РФ на изобретение «Способ получения пузырькового кластера заданной конфигурации», авторы: Архипов В.А., Усанина А.С., Перфильева К.Г., Басалаев С.А., Поленчук С.Н., Костюшин К.В.). Преимуществами разработанного способа является: равномерное распределение монодисперсных пузырьков в объеме жидкости; формирование кластера заданной конфигурации; устойчивое образование пузырька; варьирование диаметра пузырьков и их объемной концентрации.

Получены новые экспериментальные данные по закономерностям всплытия кластера монодисперсных пузырьков в присутствии и в отсутствие ПАВ на границе раздела фаз в следующем диапазоне определяемых и определяющих параметров: диаметр пузырьков в кластере (1.3-10) мм, начальный диаметр кластера пузырьков (44-110) мм, начальная объемная концентрация кластера пузырьков (0.001-0.09), количество пузырьков в кластере (37-300), коэффициент поверхностного натяжения на границе газ-жидкость (22.4-72.5) мН/м, скорость всплытия кластера пузырьков (0.5-35) см/с; коэффициент динамической вязкости жидкости (0.001-10) Па*с, плотность жидкости (975-1263) кг/м³, плотность газа (0.178-1.205) кг/м³, тип поверхностно-активного вещества: анионное и неионогенное.

Экспериментально выявлена зависимость динамики всплытия кластера пузырьков от соотношения размера пузырьков в кластере и концентрации ПАВ. Экспериментально показано, что наличие ПАВ на границе раздела фаз жидкость-газ приводит к увеличению коэффициента сопротивления кластера пузырьков. По мере увеличения концентрации ПАВ коэффициент сопротивления кластера пузырьков увеличивается (скорость кластера уменьшается).

Получены экспериментальные данные по влиянию режима (числа Рейнольдса) на динамику движения группы пузырьков. В области чисел Рейнольдса $Re = 200-600$ обнаружено, что в отсутствие ПАВ пузырьки, входящие в кластер, всплывают по спиралевидной траектории. При введении анионного ПАВ (лаурилсульфат натрия) пузырьки в кластере движутся по зигзагообразной траектории. При введении неионогенного ПАВ (синтанол АЛМ-10) пузырьки, как и в случае всплытия в воде

без ПАВ, движется по спиралевидной траектории, но при наличии ПАВ диаметр спирали уменьшается, а длина завитка спирали увеличивается. По мере увеличения концентрации анионного и неионогенного ПАВ траектория пузырька становится почти прямолинейной.

В экспериментах в области чисел Рейнольдса $Re = 0.01-1$ наблюдалось два типа всплытия кластера пузырьков: контактное и бесконтактное взаимодействие. Бесконтактный тип всплытия пузырькового кластера характеризуется движением пузырьков без соприкосновения, как в начальный момент времени, так и в процессе всплытия. Контактное взаимодействие характеризуется столкновениями пузырьков в процессе всплытия кластера, которые могут привести к образованию агломератов (цепочек) пузырьков или к коагуляции пузырьков с образованием более крупного пузырька. Анализ экспериментальных видеорядов по бесконтактному всплытию кластера пузырьков показал, что по мере увеличения расстояния, пройденного пузырьками, по всей высоте кюветы кластер расширяется, то есть эквивалентный сферический диаметр кластера пузырьков постепенно увеличивается. Данная динамика бесконтактного всплытия пузырьков не зависит от присутствия/отсутствия ПАВ в жидкости. Процесс контактного всплытия пузырьков можно разделить на три стадии: стадия движения сферы, стадия формирования и движения сфероида, стадия распада сфероида. Экспериментально показано, что величина коэффициента сопротивления кластера пузырьков зависит от типа всплытия пузырьков – при контактном всплытии кластера монодисперсных пузырьков наблюдается уменьшение коэффициента сопротивления по сравнению со случаем бесконтактного всплытия.

В экспериментах с дистиллированной водой ($Re = 200-600$) показано, что качественно динамика всплытия кластера монодисперсных пузырьков в присутствии анионного ПАВ совпадает с закономерностями всплытия кластера пузырьков при наличии неионогенного ПАВ. Однако выявлено количественное расхождение значений динамических параметров процесса всплытия кластера пузырьков в присутствии анионного ПАВ и параметров процесса всплытия кластера пузырьков при наличии неионогенного ПАВ. При идентичных начальных условиях значение стационарной скорости всплытия пузырьков в присутствии неионогенного ПАВ превышает величину стационарной скорости кластера при наличии анионного ПАВ в жидкости. Выявленное различие в значениях коэффициента сопротивления C_d кластера пузырьков для анионного и неионогенного ПАВ объясняется тем, что время достижения равновесного поверхностного натяжения на свежесформированной поверхности раствора ПАВ значительно отличается для двух используемых в экспериментах ПАВ.

В экспериментах с глицерином ($Re=0.01-1$) не выявлено влияние природы ПАВ на скорость (коэффициент сопротивления) кластера монодисперсных пузырьков. По-видимому, это объясняется тем, что в глицерине практически отсутствуют сольватные оболочки, а также растворы глицерина с используемыми поверхностно-активными веществами обладают почти одинаковой объемной диффузией и количественно схожими процессами перестройки в поверхностном слое.

В области чисел Рейнольдса $Re = 0.01-1$ обнаружено различие в наклоне эмпирических кривых $Cd(Re)$, полученных для чистой жидкости, и эмпирических кривых $Cd(Re)$, полученных для жидкости с ПАВ. Полученное различие в наклоне связано с зависимостью времени достижения равновесного поверхностного натяжения на свежеобразованной свободной поверхности раствора ПАВ от размера пузырьков. Угол наклона эмпирических кривых $Cd(Re)$, полученных для жидкости с ПАВ, указывает на то, что для пузырьков меньшего размера (меньшие числа Рейнольдса) быстрее достигалось равновесное поверхностное натяжение в процессе всплытия и наблюдалось наибольшее увеличение коэффициента сопротивления, чем для пузырьков большего размера (большие числа Рейнольдса).

В исследованном диапазоне начальной объемной концентрации пузырьков $C = 0.002-0.04$ получены эмпирические зависимости коэффициента сопротивления кластера пузырьков, всплывающих в присутствии ПАВ, от числа Рейнольдса ($Re = 0.01-1$) для разных значений коэффициента поверхностного натяжения.

В исследованном диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 0.01-1$ и начальной объемной концентрации пузырьков $C = 0.002-0.04$ получено эмпирическое выражение для скорости всплытия кластера монодисперсных пузырьков в отсутствие ПАВ.

В экспериментах с ПМС-10000 ($Re = 0.004-0.02$) не обнаружено влияния ПАВ на динамику всплытия одиночного пузырька и кластера пузырьков.

На основе полученных экспериментальных данных найдены критериальные выражения для скорости движения консолидированной системы монодисперсных пузырьков, всплывающих в отсутствие и в присутствии ПАВ, для различных диапазонов изменения параметров процесса.

Сформулирована физико-математическая модель обтекания капли при наличии ПАВ на границе раздела фаз в полной постановке с учетом динамики движения жидкости внутри и вне капли. В качестве апробации сформулированной математической модели исследована задача о всплытии одиночного газового пузырька в вязкой жидкости в присутствии ПАВ в условиях доминирования вязких сил над гравитационными. Разработана оригинальная численная методика расчета процесса всплытия одиночного газового пузырька в вязкой жидкости в присутствии ПАВ, в основе которой лежит смешанный эйлерово-лагранжев подход. Получены результаты параметрических исследований процесса всплытия одиночного газового пузырька в вязкой жидкости в присутствии ПАВ в условиях доминирования вязких сил над гравитационными (число Галилея $Ga = 0.1$).