

Сведения о выполненных работах и полученных научных результатах
в период с 01.07.2023 г. по 30.06.2024 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 движения кластера жидких капель в другой несмешивающейся жидкости в присутствии и в отсутствие поверхностно-активного вещества (ПАВ) на межфазной границе разработан способ получения кластера монодисперсных капель, основанный на импульсном введении жидкости в другую жидкость. Преимуществами способа являются равномерное распределение монодисперсных капель в объеме жидкости, устойчивое образование капель, варьирование их диаметра и объемной концентрации.

Проведены экспериментальные исследования процесса движения (всплытия) кластера монодисперсных капель изопарафинового масла (плотностью 835 кг/м³) в дистиллированной воде и водно-глицериновом растворе в присутствии ПАВ на межфазной границе в области чисел Рейнольдса $0.01 < Re < 800$ с вариацией следующих параметров: диаметр капель (1.4-5.8) мм; количество капель в кластере (10-100), начальный диаметр кластера капель (5-10) см; начальная объемная концентрация капель в кластере (0.0005-0.03); концентрация ПАВ; тип ПАВ (анионный и неионогенный), коэффициент динамической вязкости внешней жидкости (0.001-0.4) Па*с. Во всех экспериментах ПАВ вводился в дисперсионную (внешнюю) среду.

Для получения сведений об отличительных особенностях движения кластера монодисперсных капель в присутствии ПАВ проведены эксперименты для капельного течения в отсутствие ПАВ. Проанализированы общая картина движения кластера и влияние дисперсности, начальной объемной концентрации кластера капель на его скорость (коэффициент сопротивления).

Экспериментально определены значения начальной объемной концентрации капель C_v в кластере, разделяющие контактный (наличие столкновений между каплями) и бесконтактный (отсутствие столкновений между каплями) тип взаимодействия капель в кластере. В области чисел Рейнольдса $Re > 1$ бесконтактный тип взаимодействия наблюдается при $C_v < 0.002$, а контактный тип взаимодействия – при $C_v > 0.002$; в области малых чисел $Re < 1$ бесконтактный тип взаимодействия наблюдается при $C_v < 0.006$, а контактный тип взаимодействия – при $C_v > 0.006$.

Экспериментально показано, что закономерности движения капель в зависимости от их размера и концентрации ПАВ аналогичны закономерностям всплытия кластера пузырьков, рассмотренным в рамках 1-го года выполнения проекта.

Уменьшение размера капель и увеличение концентрации ПАВ приводит к уменьшению скорости движения кластера капель. Влияние ПАВ на динамику движения кластера капель наблюдается при некоторой предельной концентрации ПАВ, значение которой зависит от размера и количества (начальной объемной концентрации) капель. При этом предельная концентрация возрастает с увеличением размера капель и их количества в кластере.

В области $Re < 1$ экспериментально обнаружено, что при начальной объемной концентрации капель $Cv < 0.065$ кластер в процессе всплытия постепенно расширяется. При значениях $Cv > 0.065$ после формирования сферического кластера наблюдается единичная циркуляция периферийных капель в направлении, противоположном движению кластера капель. После этого кластер расширяется в поперечном направлении, и затем распадается, приобретая чашеобразную форму.

В диапазоне чисел Рейнольдса $Re = (0.01-1)$ обнаружено, что по сравнению со скоростью движения одиночной капли скорость движения кластера капель возрастает при фиксированном диаметре кластера по мере увеличения начальной объемной концентрации капель, а также при фиксированной начальной объемной концентрации капель по мере возрастания диаметра кластера. Аналогичная динамика наблюдается для скорости кластера капель, движущихся бесконтактно (при начальной объемной концентрации капель $Cv < 0.002$) в области чисел $Re = (200-800)$. При контактном движении капель изопарафинового масла динамика кластера меняется – наблюдается уменьшение скорости кластера в сравнении со скоростью движения одиночной капли по мере увеличения начальной объемной концентрации кластера. Обнаружено, что в области чисел $Re > 700$ (соответствующих диаметру капель $d > 4.6$ мм) скорость кластера уменьшается по мере увеличения размера капель в кластере (при фиксированной начальной объемной концентрации и диаметре кластера). Это, по-видимому, связано с увеличением степени деформации (отношения диаметра миделева сечения деформированной капли к диаметру исходной сферической капли).

Обнаружено, что в области $Re = 0.01-1$ переход к режиму «частично продуваемого облака» (характеризуемый динамическим взаимодействием капель и, как следствие, изменением скорости кластера по сравнению со скоростью одиночной капли) наблюдался при значении начальной объемной концентрации капель $Cv^* = 0.002$, которое совпадает с величиной Cv^* , полученной для кластера пузырьков в рамках 1-го года выполнения проекта. В области $Re > 200$ – при значении начальной объемной концентрации капель $Cv^* = 0.0005$. Найденные значения Cv^* не зависят от присутствия/отсутствия ПАВ.

В диапазоне чисел $Re = (200-800)$ не выявлено влияния концентрации ПАВ на закономерности движения консолидированной системы монодисперсных капель в другой несмешивающейся жидкости. В области $Re = (0.01-1)$ для исследованного диапазона коэффициента межфазного натяжения $\sigma = (6.2-12.1)$ мН/м обнаружено, что по мере увеличения концентрации ПАВ (снижения коэффициента межфазного натяжения) скорость кластера капель уменьшается. При этом зависимость коэффициента сопротивления Cd кластера капель от числа Рейнольдса в присутствии ПАВ качественно аналогична динамике экспериментальной зависимости $Cd(Re)$,

полученной в рамках 1-го года выполнения проекта для случая всплытия кластера монодисперсных пузырьков. Это свидетельствует о том, что при движении кластера капля жидкости в другой несмешивающейся жидкости, также как и для процесса всплытия пузырьков, большое влияние на динамические характеристики исследуемого процесса оказывает время достижения «равновесного» межфазного натяжения на границе двух жидкостей.

В экспериментах показано, что качественно и количественно динамика кластера монодисперсных капель в присутствии анионного ПАВ (лаурилсульфат натрия) совпадает с закономерностями движения кластера капель при наличии неионогенного ПАВ (диамида, синтанол АЛМ-10), то есть не выявлено влияния типа ПАВ на динамику всплытия группы монодисперсных капель.

Сформулирована математическая постановка задачи о движении вязкой капли жидкости в другой вязкой жидкости, в которой содержится растворимое ПАВ. Разработана численная методика решения сформулированной задачи, в основе которой лежит смешанная Лагранже-Эйлеровая методика. Разработана и отлажена программа реализации разработанной методики, проведена ее верификация на задаче об обтекании капли в предположении небольших значений числа Рейнольдса. Проведено тестирование разработанной методики расчета на основе известных аналитических решений и экспериментальных данных. Рассмотрены случаи медленных течений, предполагающих возможность аналитического решения Адамара-Рыбчинского. Также рассмотрена задача о собственных колебаниях капли, аналитическое решение которой представлено в работе [Miller C.A., Scriven L.E. The oscillation of a fluid droplet immersed in another fluid // J. Fluid Mech. 1968. V. 33, I. 3. P. 417-435].

Предложена математическая постановка задача о всплытии двух соосно расположенных газовых пузырьков в вязкой жидкости с растворенным ПАВ в условиях доминирования гравитационных сил над вязкими (число Галилея $Ga > 100$). Проведены численные эксперименты по всплытию двух газовых пузырьков миллиметровых размеров, изначально расположенных на небольшом расстоянии друг от друга в воде с растворенным ПАВ, адсорбирующимся на свободную поверхность в соответствии с моделью медленной сорбции. Проведены параметрические расчеты по нахождению распределения кинематических и динамических характеристик в окрестности пузырьков и на межфазных границах, а также характеристик, демонстрирующих процессы переноса и сорбции ПАВ. Исследована эволюция свободной поверхности пузырьков с течением времени. Проведены параметрические исследования влияния начальных размеров и положения пузырьков на динамику всплытия двух воздушных пузырьков в воде в отсутствие ПАВ.

На основе экспериментальных данных, полученных в рамках 1-го и 2-го года выполнения проекта, и литературного обзора эмпирических и теоретических зависимостей для коэффициента сопротивления (скорости) кластера деформируемых частиц (капель, пузырьков) при наличии и в отсутствие ПАВ предложены обобщенные эмпирические зависимости для коэффициента сопротивления монодисперсного кластера деформируемых частиц, движущихся бесконтактно в присутствии и в отсутствие ПАВ.