

Сведения о выполненных работах и  
полученных научных результатах в 2022 году

по проекту **«Экспериментально-теоретическое исследование  
процессов формирования, динамики и теплообмена облака капель  
в поле силы тяжести»**,

поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 22-19-00307

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

С целью получения экспериментальных данных по влиянию параметров внешней среды (температуры, направления и скорости обдувающего потока) на эволюцию жидко-капельного облака разработаны оригинальная установка и методика исследования качественной картины и количественных характеристик процесса гравитационного осаждения облака монодисперсных капель, образующихся после разрушения макрообъема жидкости. Разработанная экспериментальная установка позволяет формировать компактный кластер монодисперсных жидких капель свободно висящих на концах капилляров; генерировать периодический срыв кластера капель в свободное падение с концов капилляров с задаваемой частотой; формировать капли разного размера; измерять скорость осаждения центра масс компактного кластера в неподвижной среде при разных температурах; оценивать степень изменения размера кластера (разлет капель) при осаждении его в неподвижной среде; регистрировать температуру среды; определять динамику поведения (эволюцию) кластера при обдуве его внешним встречным и боковым потоком воздуха с разной температурой; проводить визуализацию динамики и эволюции кластера во время его осаждения при обдуве встречным и боковым потоками; проводить оценку изменения размера капель в кластере при обдуве потоком воздуха разной температуры вследствие испарения; варьировать локализацию точек воздействия встречного и бокового обдува по отношению к начальному положению кластера капель; регулировать скорость и температуру встречного и бокового потоков. Во всех экспериментах, проведенных в рамках проекта, направление вертикального обдувающего потока соответствовало встречному обдуву кластера (снизу вверх). При этом моделировалось влияние конвективной колонки, возникающей в очаге пожара.

Для экспериментального исследования процесса эволюции группы капель в зависимости от температуры и скорости обдувающего внешнего потока разработан новый способ получения компактного кластера монодисперсных капель жидкости (Архипов В.А., Басалаев С.А., Золоторев Н.Н., Поленчук С.Н., Романдин В.И., Перфильева К.Г., Усанина А.С. Заявка на патент на изобретение РФ № 2022129777 от 17.11.2022 г). Преимуществами разработанного способа является: отсутствие пузырьков воздуха в капиллярах; получение идентичных устойчиво висящих капель на концах капилляров; обеспечение стабильного одновременного отрыва капель от капилляров; исключение слияния (коагуляции) исходных капель, формируемых на

концах капилляров; варьирование размера капель за счет введения поверхностно-активного вещества в раствор рабочей жидкости.

Проведена серия экспериментальных исследований динамики гравитационного осаждения жидко-капельного облака (в количестве 10, 30, 60 капель) дистиллированной воды и раствора дистиллированная вода-додецилсульфат натрия в воздухе. При проведении экспериментов по гравитационному осаждению облака жидких капель в окружающей среде получены результаты по влиянию концентрации капель, температуры среды, скорости восходящего потока и коэффициента поверхностного натяжения жидкости на качественную картину осаждения облака капель, скорость осаждения и коэффициент аэродинамического сопротивления. Результаты экспериментальных исследований получены в следующем диапазоне определяемых и определяющих параметров: диаметр капель в кластере  $d = (1.6-2.2)$  мм, начальный диаметр кластера капель  $D = 3$  см, начальная объемная концентрация облака капель  $C = (0.0056-0.024)$ , число капель в кластере  $N = (37-60)$  капель, коэффициент поверхностного натяжения жидкости  $\delta = (33.5-71.25)$  мН/м, скорость внешнего обдувающего потока  $u = (0.5-1.2)$  м/с, число Рейнольдса  $Re = (4200-7600)$ ; высота участка осаждения кластера капель до 4 м.

Анализ видеорядов процесса гравитационного осаждения жидко-капельного монодисперсного облака показал, что общая картина осаждения не зависит от начальной объемной концентрации капель в облаке. Показано, что отношение поперечной  $a$  и продольной  $b$  осей эллипсоидального облака капель жидкости  $f = a/b < 1$ , то есть в процессе осаждения изначально сферический кластер капель деформируется, принимая форму вытянутого в направлении движения эллипсоида. Величина  $f$  меняется по мере увеличения пройденного им расстояния (отношение  $f = a/b$  уменьшается). Далее при прохождении некоторого критического расстояния облако капель расширяется и кластер начинает осаждаться в режиме продуваемого облака, то есть кластер движется со скоростью одиночной капли.

На конфигурацию кластера капель оказывает влияние коэффициент поверхностного натяжения жидкости и скорость внешнего обдувающего потока. Результаты экспериментов показали, что при введении поверхностно-активного вещества (додецилсульфат натрия) в дистиллированную воду или, другими словами, при уменьшении коэффициента поверхностного натяжения жидкости и при наличии обдувающего потока наблюдается уменьшение времени стадии деформации и перехода кластера в режим продуваемого облака. При наличии скорости встречного обдувающего потока введением поверхностно-активного вещества в рабочую жидкость приводит к увеличению отношения осей эллипсоидального кластера  $f$  (форма кластера становится менее вытянутой в направлении осаждения).

Экспериментально обнаружено, что при увеличении коэффициента поверхностного натяжения дистиллированной воды от 33.5 до 71.25 мН/м скорость гравитационного осаждения кластера капель увеличивается от 290 до 380 см/с (в экспериментах скорость осаждения кластера жидких капель рассчитывалась по его центру масс). По мере уменьшения начальной объемной концентрации капель в

облаке от 0.024 ( $N = 60$  капель) до 0.0056 ( $N = 37$  капель) скорость осаждения капель уменьшается от 380 до 210 см/с. При увеличении скорости набегающего внешнего потока, направленного противоположно движению кластера (конвективная колонка), от 0 до 1.2 м/с скорость осаждения жидко-капельного кластера уменьшается от 380 до 289 см/с.

В исследованном диапазоне температур заметного влияния температуры на характеристики движения кластера не обнаружено.

В области чисел Рейнольдса  $Re = (4200-7600)$  получены эмпирические зависимости для скорости гравитационного осаждения группы капель, в зависимости от скорости обдувающего воздушного потока.

Проведено обобщение полученных экспериментальных результатов исследования процесса гравитационного осаждения группы монодисперсных жидких капель в потоке воздуха. На основе проведенных экспериментальных исследований рассматриваемого процесса получены эмпирические зависимости и критериальные соотношения для оценки влияния на скорость осаждения и коэффициент аэродинамического сопротивления скорости обдувающего потока и начальной концентрации капель в кластере.

Расширена физико-математическая модель эволюции жидко-капельного аэрозольного облака в атмосфере с учетом результатов экспериментальных исследований. Модифицированная физико-математическая модель эволюции облака жидко-капельного аэрозоля при осаждении в высокотемпературной среде позволяет провести оценку динамики гравитационного осаждения, нагрева и испарения полидисперсных капель при сбросе хладагента с водосливного устройства летательного аппарата и определить плотность орошения смоченной полосы.

На базе модифицированной физико-математической модели разработан численный алгоритм и программа расчета плотности орошения подстилающей поверхности. С использованием модифицированной физико-математической модели проведено численное моделирование влияния высоты сброса, параметров шлейфа первичного облака, а также расстояния до очага пожара на плотность орошения подстилающей поверхности.

С использованием модифицированной математической модели проведено математическое моделирование и получены результаты параметрических расчетов процесса эволюции облака жидко-капельного аэрозоля и определения плотности орошения подстилающей поверхности применительно к актуальной практической задаче авиационного тушения пожаров.