

Сведения о выполненных работах и
полученных научных результатах в 2023 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 расширения базы экспериментальных данных по влиянию дисперсного состава капель, температуры внешней среды и начальной объемной концентрации облака капель на эволюцию жидко-капельного облака модернизирована экспериментальная установка для исследования динамики осаждения и процесса испарения облака капель в высокотемпературной среде. Проведены работы по изготовлению и отладке конструктивных элементов модернизированной установки.

Разработан способ создания облака бидисперсных капель жидкости, заключающийся в использовании игл разного калибра, расположенных в заданной последовательности. Изготовлено и отлажено двухкамерное устройство для получения кластера бидисперсных капель.

Получены новые результаты экспериментального исследования процесса гравитационного осаждения и испарения группы монодисперсных и бидисперсных капель дистиллированной воды в воздушной среде. При проведении цикла экспериментов по гравитационному осаждению облака жидких монодисперсных капель дистиллированной воды в воздухе получены новые данные по влиянию температуры внешней среды на скорость гравитационного осаждения и коэффициент сопротивления облака жидких монодисперсных капель в двух режимов осаждения («частично продуваемое», «продуваемое» облако).

Получены уточненные зависимости скорости осаждения от пройденного расстояния, а также значения коэффициента аэродинамического сопротивления жидко-капельного облака в высокотемпературной среде с учетом вдува продуктов испарения с поверхности капли, а также разности температур капель и внешней среды. Показано, что вдув продуктов испарения с поверхности капли приводит к уменьшению коэффициента сопротивления. При испарении капли в высокотемпературной среде на процесс ее осаждения влияют два конкурирующих фактора. Первый из них связан с уменьшением размера капли, что должно уменьшать скорость осаждения. Второй фактор обусловлен испарением с поверхности капли, которое уменьшает сопротивление и, соответственно, увеличивает скорость гравитационного осаждения. Показано, что влияние испарения на динамику капли оказывается неоднозначным. Для капель небольшого размера $D < 2.5$ мм основным фактором, влияющим на скорость осаждения, является уменьшение ее размера.

В результате этого при повышении температуры окружающей среды и, как следствие, интенсификации испарения, наблюдается незначительное уменьшение скорости осаждения. С ростом размера капли повышается значимость второго фактора, связанного с изменением коэффициента сопротивления. При этом для капель диаметром $D > 2.5$ мм влияние испарения на ее движение становится несущественным. Для более крупных капель доминирующим становится механизм, связанный с уменьшением коэффициента сопротивления. В результате этого с интенсификацией испарения наблюдается увеличение скорости капли.

Определена зависимость скорости осаждения центра масс кластера от начальной концентрации капель. Показано, что при снижении концентрации капель в кластере зависимость скорости осаждения его центра масс от пройденного расстояния приближается к соответствующей зависимости для одиночной капли, размер которой соответствует размеру капель в кластере (режим "продуваемого" облака).

В процессе гравитационного осаждения бидисперсного кластера через начальный промежуток времени, меньший по сравнению со временем его полного осаждения происходит распад бидисперсного кластера на два монодисперсных кластера. При разделении бидисперсного кластера на два монодисперсных концентрация капель в каждом из этих отдельных кластеров уменьшается, и дальнейшее осаждение каждого из них происходит в режиме «частично продуваемого» облака. Это, в свою очередь, приводит к снижению скорости их гравитационного осаждения и соответствию этой скорости со скоростью осаждения одиночной капли. Таким образом, динамика осаждения бидисперсного кластера существенно отличается от соответствующей динамики монодисперсного кластера и определяется наличием двух характерных скоростей.

При проведении экспериментов по исследованию гравитационного осаждения бидисперсного кластера капель наблюдались процессы коагуляции капель с образованием более крупных капель, чем исходные капли в каждом из кластеров. Кроме того наблюдались также процессы дробления, связанные с взаимодействием капель разных размеров, входящих в бидисперсный кластер. В результате этих процессов изменялся дисперсный состав кластера, что необходимо в дальнейшем более детально исследовать и учитывать в параметрах физико-математической модели.

Показано, что скорость испарения монодисперсного и бидисперсного кластера капель возрастает при уменьшении диаметра капли, что обусловлено снижением скорости капель гравитационного осаждения (время пребывания капель меньшего диаметра превышает время пребывания для капель большего диаметра). Скорость испарения для монодисперсного кластера из капель существенно меньше скорости испарения одиночной капли. Это объясняется тем, что наличие водяных паров между каплями в кластере задерживает процессы испарения. Для бидисперсного кластера капель скорость испарения выше, чем у монодисперсного.

Проведено уточнение механизма испарения облака бидисперсных капель при осаждении в высокотемпературной среде и проведена оценка вклада теплового

излучения и конвективного нагрева на характеристики испарения капель в двух режимах осаднения («частично продуваемое», «продуваемое» облако). Установлено, что при уменьшении диаметра капли интенсифицируется ее теплообмен с окружающей средой, что приводит к увеличению температуры капли. Температура мелких капель при этом может достичь температуры кипения, что вызовет практически мгновенное испарение этих капель. Увеличение мощности подводимой энергии приводит к интенсификации испарения и большей потере массы.

Сформулирована расширенная физико-математическая модель эволюции жидко-капельного облака с учетом данных по движению кластера капель в высокотемпературной среде. Расширенная математическая модель учитывает форму зоны горения в очаге пожара и интенсивность горения в ней. В модель включены зависимости для определения параметров лесного пожара: формы и размеров очага пожара и интенсивности горения; параметров первичного полидисперсного облака капель хладагента: высота и координаты сброса жидкости; параметры функции распределения капель по размерам, а также информация о состоянии атмосферы: скорость и направление ветра, температура, тип устойчивости.

Получены результаты параметрических расчетов влияния высоты сброса, параметров шлейфа первичного облака, направления и скорости ветра, расстояния до очага пожара на плотность орошения подстилающей поверхности при гравитационном осаднении жидко-капельного облака хладагента, изменения концентрации капель при рассеянии жидко-капельного облака в процессе гравитационного осаднения. Определены характерные размеры участков осаднения облака в трех режимах осаднения («непродуваемое», «частично продуваемое», «продуваемое» облако).

Сформулированы рекомендации по выбору отдельных параметров технологии авиационного тушения пожаров.

Результаты проведенных исследований позволяют усовершенствовать технологию авиационных тушений пожаров с использованием водосливного устройства без проведения летного эксперимента, определить основные факторы (высота, скорость и направление полета; интенсивность сброса жидкости, скорость и направление ветра, турбулентность и тип устойчивости атмосферы, интенсивность пожара и геометрические характеристики очага пожара), влияющие на эффективность применения воздушного судна при тушении пожара.

Результаты сравнительного анализа показали, что разрабатываемая в рамках настоящего проекта физико-математическая модель является наиболее полной, учитывает наибольшее количество определяющих параметров и процессов, а также позволяет получить более полную информацию о динамике жидко-капельного облака и его взаимодействии с очагом пожара.