

УДК 532.6

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КАПЕЛЬ ВОДЫ И СУСПЕНЗИЙ ПРИ ИХ СТОЛКНОВЕНИЯХ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

© 2019 г. Г. В. Кузнецов¹, П. А. Стрижак^{1, *}, Н. Е. Шлегель¹

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

*E-mail: pavelspa@tpu.ru

Поступила в редакцию 24.10.2018 г.

После доработки 15.01.2019 г.

Принята к публикации 11.02.2019 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований столкновений капель воды и суспензий на ее основе в газовой среде с использованием высокоскоростной видеорегистрации, специализированных программных комплексов слежения за исходными каплями и образующимися фрагментами. Приведены видеogramмы с иллюстрацией типичных режимов столкновений капель: отскок, разлет, коагуляция, дробление. Рассмотрены последствия столкновений капель в условиях свободного падения в воздухе при нормальных условиях (температура 20°C), а также при движении во встречных потоках разогретого воздуха (до 500°C) и продуктов сгорания (800–850°C). Выполнен статистический анализ режимов столкновений, представлены зависимости частоты их реализации от группы факторов (размеров, скоростей движения, углов столкновений, критериальных выражений, учитывающих безразмерные линейные и угловые параметры взаимодействия). Установлены диапазоны изменения площади поверхности жидкости при фрагментации и распаде капель вследствие столкновений в газовых средах с разной температурой.

Ключевые слова: вода, суспензия, капли, взаимодействие, столкновения, коагуляция, отскок, фрагментация, распад, измельчение

DOI: 10.1134/S0040357119050063

ВВЕДЕНИЕ

Процессы коагуляции, дробления и фрагментации капель жидкостей при их взаимодействии в газовой среде на протяжении многих лет привлекают внимание исследователей. Актуальность данного направления научных исследований обусловлена несколькими факторами, основными из которых являются ограничения, сдерживающие развитие перспективных газопарокапельных технологий [1–6]: термическая и огневая очистка воды и других жидкостей от нерегламентированных примесей; теплообменные технологии испарения и конденсации в трактах, узлах, блоках и агрегатах теплоэнергетического оборудования; создание теплоносителей из дымовых газов, паров и капель воды; зажигание композиционных топлив с исключением эффектов закупоривания форсунок и угасания факела в топочных камерах. Высокий потенциал каждой из указанных и многих других газопарокапельных технологий обусловлен возможностями варьирования группы основных характеристик соответствующих многофазных и многокомпонентных потоков в широких диапазонах (гораздо шире, чем в жидкостных или газовых потоках). В частности, в [4–6] рассмотре-

ны преимущества применения смешанных газопарокапельных потоков для интенсификации зажигания топлив. Микродиспергирование капель вследствие перегрева позволяет существенно снизить инерционность процесса зажигания, минимизировать требуемый расход энергии, времени и ресурсов. При этом возможны масштабные изменения и в области снижения антропогенных выбросов и полноты выгорания топлива [4–6].

В [7] отражены закономерности формирования и перестройки многофазных и многокомпонентных газопарокапельных потоков при огневой и термической очистке жидкостей (в частности, воды) от нерегламентированных твердых и жидких примесей. В [8–10] выделены особенности диспергирования нагреваемых сложных по компонентному составу капель и влияние этого процесса на характеристики многофазных и многокомпонентных газопарокапельных потоков в теплообменных аппаратах. В [7] продемонстрированы типичные траектории движения капель жидкостей в потоках, соответствующих перечисленным выше технологиям. В [11] показано, что свойства и структура капель жидкостей могут существенно изменяться при интенсивном нагреве. Эти аспекты могут ускорять процессы испарения

капель, изменения компонентного состава и структуры газопарокапельных потоков. В [12–14] на примере сложных по компонентному составу суспензионных топлив показано влияние процессов диспергирования и фрагментации капель на характеристики многокомпонентных и многофазных газопарокапельных топливных потоков с акцентом на динамику горения.

Из анализа [15–17] можно сделать вывод о том, что неизученными в полной мере остаются сложно прогнозируемые и контролируемые процессы изменения характеристик (в первую очередь, скорости с учетом ламинарного, переходного и турбулентного режимов движения) многофазных и многокомпонентных газопарокапельных потоков вследствие процессов коагуляции, дробления и диспергирования капель, их уноса и испарения.

К настоящему моменту времени известны результаты экспериментальных исследований процессов взаимодействия капель жидкостей в газовой среде при применении двух подходов (феноменологического и статистического): рассмотрении столкновений элементов капельного аэрозоля (большой совокупности капель) [18] в потоке продуктов сгорания или изучении закономерностей коагуляции, дробления и фрагментации капель воды в воздухе [19]. Пока не опубликованы экспериментальные данные о характеристиках, условиях и режимах столкновений существенно неоднородных капель жидкостей, в частности, суспензий. В соответствии с заключениями [20] можно предположить, что основная причина состоит в высоких требованиях к регистрирующим устройствам, особенно в условиях интенсивных фазовых превращений и химического реагирования, например, в потоке разогретого воздуха или при движении через продукты сгорания.

Цель настоящей работы – экспериментальное исследование режимов, условий и характеристик процессов столкновений капель типичных суспензий в газовой среде (в сравнении с водой без твердых примесей).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении опытов использовались два стенда, первый из которых (рис. 1а) позволяет регистрировать условия десятков и даже сотен столкновений капель в каждом из экспериментов (длительность регистрации от 5 до 10 с) за счет смешения потоков аэрозоля и газов (статистический подход), а второй (рис. 1б) предназначен для регистрации единичных столкновений двух капель в каждом из опытов (феноменологический подход). Необходимость применения двух стендов обусловлена тем, что у каждого из них имеются как преимущества, так и ограничения по усло-

виям и трудоемкости выполнения исследований. При последовательном применении феноменологического и статистического подходов можно получить существенно больше достоверной экспериментальной информации. Обе методики соответствуют двум основным трендами исследований процессов взаимодействия капель [18–20]. Это особенно важно для неоднородных капель, так как они не изучены ни по одной из схем регистрации.

Использовавшиеся в проведенных экспериментах процедуры генерации потоков разогретого воздуха и продуктов сгорания, основные методики контроля параметров в газовой фазе детально описаны в [18]. Научная новизна настоящей работы состояла в том, что одновременно применялись либо два генератора аэрозоля, либо два дозатора капель. При этом один из них формировал капли воды, а второй – суспензии (рис. 2). В ряде опытов двумя генераторами формировались только капли воды или суспензии. Практическая значимость проведения таких экспериментов состоит в том, что обеспечивается возможность одновременной регистрации особенностей распада неоднородных и однородных капель. Такие взаимодействия характерны многим многокомпонентным и многофазным газопарокапельным потокам [7]. Важно не только определить условия, необходимые и достаточные для коагуляции, дробления и разлета однородных и существенно неоднородных капель, но и зарегистрировать характерные последствия столкновений капель, в частности число и размеры вторичных фрагментов жидкости. Это позволит оценить суммарные площади поверхности жидкости до и после взаимодействия капель, что особенно важно для теплообменных газопарокапельных и типичных распылительных систем (направленных, как правило, на измельчение капель до минимально возможных размеров).

На рис. 2 приведены видеок cadры с изображением объектов исследования при шести возможных режимах столкновений капель, как показано в статье [19]. Серия таких кадров применялась для изучения особенностей механизмов взаимодействия капель воды и суспензий (рис. 2). Основные диапазоны варьируемых параметров экспериментов: радиусы (R_d) капель от 0.1 до 5 мм, скорость движения (U_d) от 0 до 10 м/с, углы столкновений (α_d) $0-\pi/2$, относительная концентрация в аэрозоле (γ_d) 0.001–0.002 м³ капель жидкости в 1 м³ газа, температура (T_g) продуктов сгорания 800–850°С и потока воздуха 20–500°С, скорость воздуха и продуктов сгорания (U_g) от 0 до 10 м/с; относительная массовая концентрация графитовых частиц (размеры 50 мкм) от 0 до 5% (при более высоких концентрациях дисперсной фазы сложно обеспечить устойчивость суспензий, т.е. замедлить рассло-

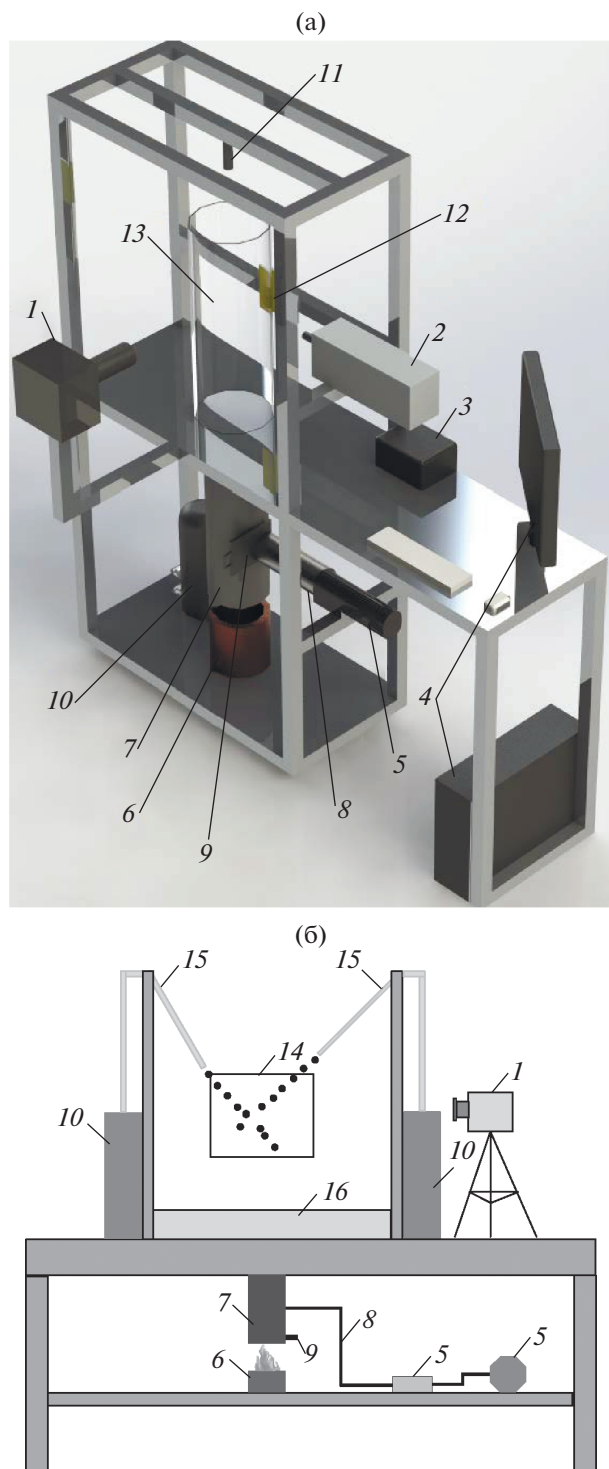


Рис. 1. Схема стенда для опытов с аэрозолем (а) и двумя соударяющимися каплями (б): 1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – генератор лазерного излучения; 3 – синхронизатор; 4 – персональный компьютер; 5 – воздухонагреватель и нагнетатель; 6 – горелочное устройство; 7 – канал подачи продуктов сгорания; 8 – тракт подачи нагретого воздушного потока; 9 – шибер (необходим для раздельной подачи продуктов сгорания и разогретого воздуха); 10 – резервуар с водой; 11 – форсуночное устройство; 12 – прожектор; 13 – цилиндр из кварцевого стекла; 14 – область регистрации; 15 – капилляр подачи жидкости; 16 – резервуар для сбора капель.

ние, как следствие, проводить серии экспериментов со стабильными условиями впрыска неоднородных капель генераторами). Выбор графита в качестве материала твердых частиц в составе капель обусловлен несколькими причинами: при их применении можно обеспечить достаточно однородный состав генерируемых фрагментов суспензий; основные физические свойства графита хорошо изучены и близки большинству твердых топлив и добавок; ранее были изучены особенности трансформации поверхности движущихся капель и больших нераспыленных массивов, содержащих такие частицы [5].

В опытах с аэрозолем для контроля скоростей движения потока газов (U_g) использовался оптический метод PIV (particle image velocimetry), для контроля скоростей движения капель жидкостей (U_d) – метод PTV (particle tracking velocimetry). Размеры капель R_d измерялись с использованием метода IPI (interferometric particle imaging), регистрирующим размеры сферических и каплевидных тел по среднему радиусу или диаметру. Погрешности определения значений U_g и U_d не превысили 3.4%, а значений R_d – 2.1%. Все методы интегрированы на базе программного обеспечения Actual Flow. В опытах с двумя каплями применялись специализированные алгоритмы слежения за перемещающимися в области регистрации каплями в составе комплекса Tema Automotive.

При проведении статистического анализа характеристик процесса взаимодействия капель жидкости и суспензии в составе аэрозоля, смешивающегося со встречным газовым потоком, использовалась методика расчета числа столкновений, реализуемых в одном из четырех режимов, к общему числу столкновений. В таком случае вычислялись значения относительных частот реализации коагуляции, разлета, дробления и отскока капель: $P_1...P_4$. При анализе влияния группы основных факторов на значения $P_1...P_4$ рассматривалось не менее 100 столкновений капель при идентичных условиях.

При критериальной обработке результатов опытов выполнялся расчет чисел Вебера для капель (снаряда и мишени) по общеизвестному и широко применяемому выражению с учетом относительной скорости движения $U_{rel} = (U_{d1}^2 + U_{d2}^2 - 2\cos(\alpha_d)|U_{d1}U_{d2}|)^{0.5}$ [18, 19]: $We = 2\rho R_d U_{rel}^2 / \sigma$. Значения плотности и поверхностного натяжения воды и суспензий принимались в соответствии с известными справочными данными с учетом зависимости от температур.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обработка результатов опытов позволила рассчитать значения $P_1...P_4$ для исследованных

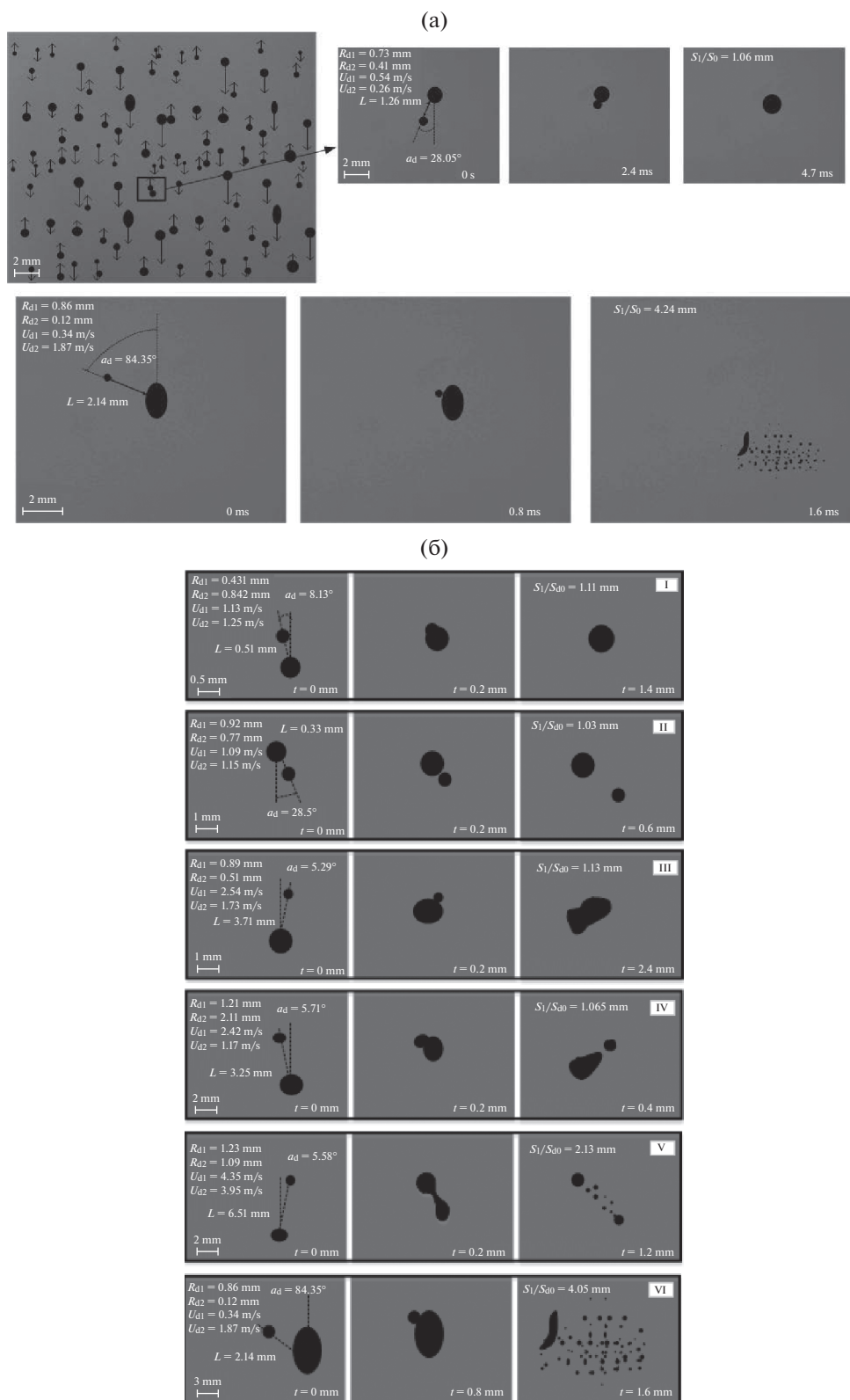


Рис. 2. Типичные кадры из экспериментов с аэрозолем (а) и двумя каплями (б) для иллюстрации различных режимов их столкновений в газовой среде (названия режимов приведены в соответствии с терминологией [17–19]): I – слияние (коагуляция) капель за счет сил поверхностного натяжения; II – отскок; III – слияние (коагуляция) капель; IV – кратковременное слияние капель с дальнейшим разлетом; V – дробление капли путем образования перешейка; VI – дробление с образованием аэрозольного облака.

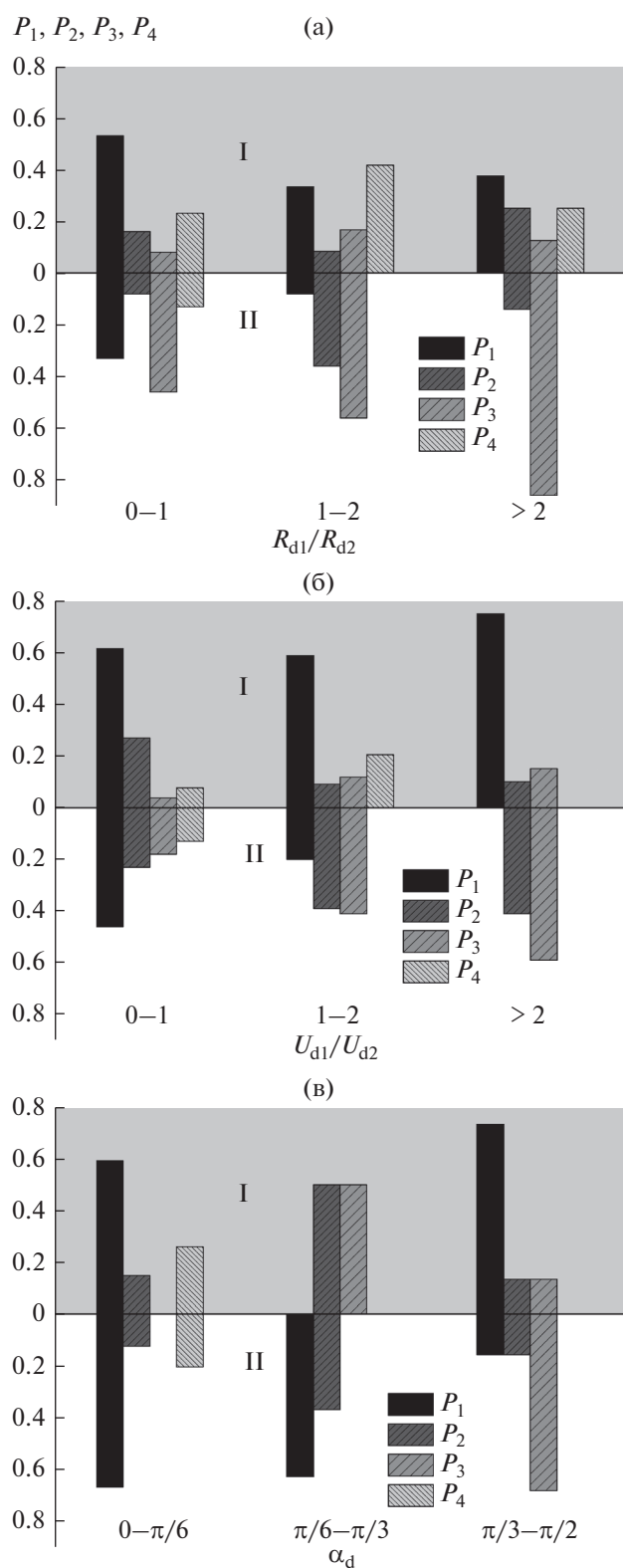


Рис. 3. Относительные частоты реализации режимов столкновений каплей (I — вода, II — графитовая суспензия при относительной массовой концентрации дисперсной фазы 5%) в газовой среде при разных соотношениях размеров каплей (а), относительных скоростей движения (б), углах атаки (в).

столкновений каплей, а также вычислить переходные значения чисел Вебера для каждого из изучаемых режимов столкновений (отскок, коагуляция, разлет, дробление). На рис. 3 и 4 представлены основные результаты экспериментов с учетом влияния ключевых (размеры, скорости движения и углы атаки каплей) варьируемых параметров на условия и характеристики трансформации поверхности соударяющихся фрагментов жидкости при применении двух схем: с аэрозолем (статистический подход) и двумя индивидуальными каплями (феноменологический подход).

Влияние размеров и скоростей движения каплей, иллюстрирующее повышение значений P_2 и P_3 и снижение P_1 при максимальных достигнутых значениях R_d и U_d , довольно очевидно и хорошо соответствует результатам других авторов, в частности, [19]. Значения P_4 высоки (могут превышать 0.5) лишь в области малых чисел Вебера (до 2), соответственно, небольших скоростей движения и размеров каплей. Если же выполнять анализ влияния углов столкновений, то влияние этого фактора в работах других авторов слабо изучено вследствие высокой трудоемкости (необходим контроль траекторий перемещения каплей с применением не менее двух высокоскоростных видеокамер). В опытах [18] впервые были сделаны такие оценки. В настоящей работе установлено (рис. 3), что при малых (0° – 10°) значениях α_d доминирует коагуляция, в области больших значений (80° – 90°) определяющее влияние имеет дробление, а для среднего диапазона α_d регистрировались три варианта последствий (разлет, дробление, коагуляция). Отскоку характерны условия взаимодействия каплей при разных углах атаки, но наиболее типичные (значения P_4 максимальны) условия зарегистрированы при сонаправленном движении каплей.

При анализе результатов опытов по типичной методике, предполагающей расчет чисел Вебера (рис. 4) для каплей-мишеней и каплей-снарядов, установлены существенные отличия границ переходов между доминированием отскока, коагуляции, разлета и дробления, особенно если принимать во внимание разное положение при столкновениях каплей воды и суспензии (т.е. чередовать снаряды и мишени). При этом установлено, что чем выше температура газовой среды, тем значительнее отличаются условия распада или коагуляции каплей воды и суспензии. Это обусловлено не только разным поверхностным натяжением воды и суспензий при нагревании, но и достаточно сложными процессами агломерации твердых частиц в неоднородных каплях.

На основе полученных результатов проведенных экспериментов целесообразно отметить группу факторов, определяющих отличия условий и характеристик (чисел Вебера не только в момент столкновения, но и образующихся при

соударениях капель) взаимодействия капель воды и типичных суспензий.

Поверхностное натяжение, а также изменение этого параметра в процессе прогрева капель. В соответствии с известными справочными данными (приведены в статьях [17–20]) при нормальных условиях отличия коэффициентов поверхностного натяжения воды и водных суспензий с относительной массовой концентрацией твердых частиц менее 5% отличаются не более чем на 4–7%. При более высоких концентрациях дисперсной фазы поверхностное натяжение существенно возрастает и, казалось бы, для разрушения капли требуется большая энергия. Но, как показали проведенные эксперименты, чем выше концентрация твердых включений в капле суспензии, тем значительнее трансформация поверхности последней. Это иллюстрирует влияние иных сил (не только связанных с поверхностным натяжением), в частности инерции и внутреннего трения вследствие неравномерного распределения частиц дисперсной фазы в капле. При нагреве поверхностное натяжение воды и суспензии на ее основе существенно (в 2–3 раза) снижается. Это должно способствовать интенсивной трансформации поверхности капли, но проведенные эксперименты показали несколько иной результат. В потоке продуктов сгорания форма капель несущественно меняется относительно сферической (по сравнению с потоком воздуха без нагрева при аналогичных скоростях движения). Это можно объяснить формированием вокруг капли буферного парового слоя. Чем выше температура и скорость потока газов, тем существеннее торможение капель аэрозоля в потоке за счет испарения и соответствующего уменьшения размеров последних. Как следствие, и в этом случае не все особенности трансформации поверхности капли определяются поверхностным натяжением жидкости.

Наличие твердых частиц в составе капель, их размеры, концентрация и фактор агломерации. Скорее всего, именно фактор агломерации твердых частиц способствует неустойчивости капли. В статье [5] детально проанализировано влияние данного эффекта на трансформацию поверхности жидкостного массива. В частности, на видеogramмах [5] видно, что чем больше размеры и число твердых частиц в капле, тем чаще регистрировались условия скопления и даже выступления за поверхности капли твердых частиц (из-за разности плотностей). Стоит отметить, что, скорее всего, на монолитность капли определяющее влияние оказывают гидрофильные и гидрофобные свойства материала твердых частиц. Чем лучше они смачиваются, тем слабее будут эффекты трансформации поверхности капли. Видеogramмы показали, что во всех зарегистрированных случаях контакт капли воды с деформированной каплей суспензии приводил к распаду обеих. Как

и можно было ожидать, рост концентрации твердых частиц способствовал усилению эффекта агломерации.

Соударение капель воды с разными частями капли суспензии (представляет существенно неоднородную систему вследствие расслоения), т.е. контакт с водным фрагментом или объемом, представляющим густую гелеобразную композицию. При добавлении твердых частиц в каплю ее средняя (или так называемая эффективная) плотность существенно увеличивается. Это приводит к снижению предельных значений скоростей движения и размеров капель, достаточных для их распада при контакте с другими каплями. Результат вполне очевиден, так как растет разница плотностей взаимодействующих капель. Однако стоит отметить, что при малых размерах капель суспензий и малых скоростях движения приближающиеся капли воды не разрушались при контакте (соударении), а реализовывался разлет, т.е. более плотная капля суспензии проходила через каплю воды.

Вязкость и плотность суспензий и воды. Вязкость и плотность суспензий при использовании гидрофильных материалов дисперсной фазы могут довольно существенно увеличиваться. Используемые углеродистые частицы продемонстрировали достаточно хорошие гидрофильные свойства. Поэтому не регистрировались условия отрыва “обезвоженных” твердых частиц с поверхности капли при ее полете. Лишь при соударении с большими скоростями можно было наблюдать разделение элементов дисперсной и жидкой фаз.

Форма капель, прицельное расстояние между ними, угол атаки. Проведенный анализ видеок кадров показал, что форма капель суспензий отличается от сферической за счет агломерации частиц дисперсной фазы. Чаще всего регистрировались формы эллипсоида, парашюта и даже блина. Контакт сферической капли воды с такими каплями приводил, как правило, к разлету и дроблению, реже регистрировались коагуляция и отскок. Определяющее влияние оказывал угол атаки. Например, при угле взаимодействия от 0° до 10°–15° (т.е. при практически сонаправленном движении фрагментов жидкости и суспензии) доминировали коагуляция и отскок (чем выше относительная скорость, тем больше частота реализации коагуляции). Для угла атаки от 70° до 90° характерны условия дробления. В среднем диапазоне изменения угла взаимодействия важную роль играла конфигурация поверхности обеих капель. Для схем сфера–сфера или сфера–эллипсоид чаще регистрировались разлет или коагуляция, а в случае блинов и парашютов доминировали условия дробления. Лишь при совпадении центров масс сталкивающихся капель или кратном отличии их размеров регистрировались условия разлета. Эти эффек-

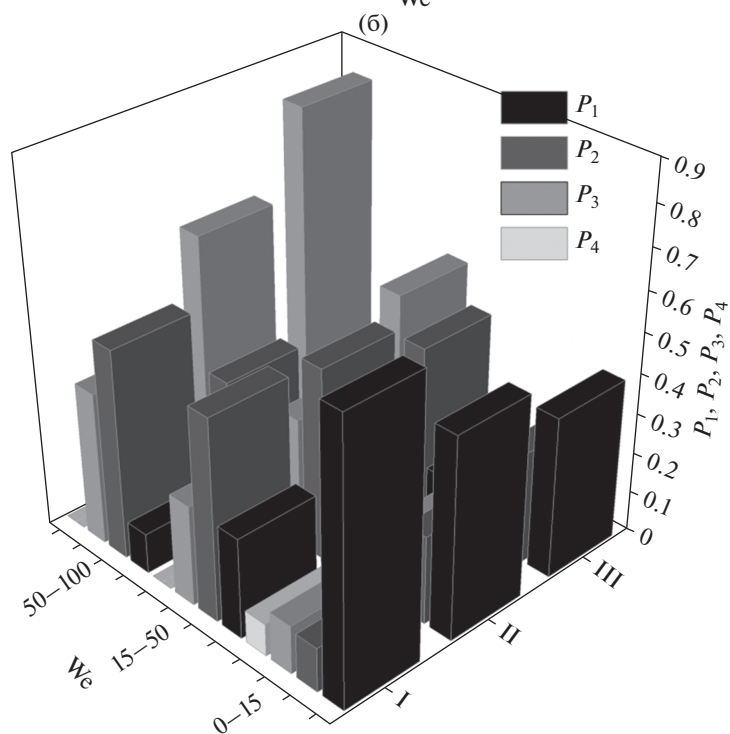
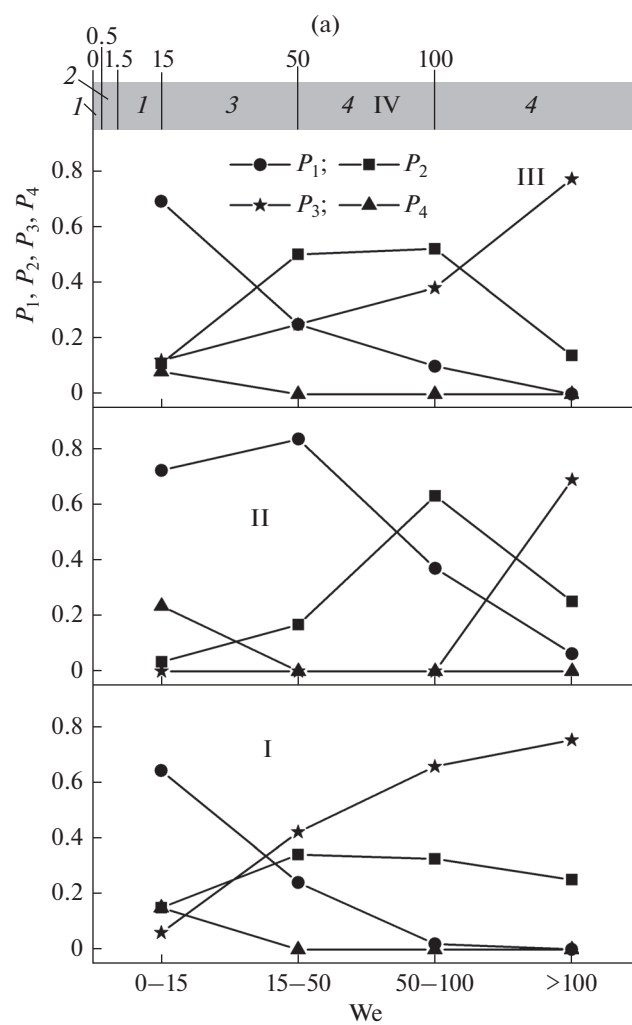


Рис. 4. Отличия характеристик столкновений капель воды и суспензии (относительная массовая концентрация дисперсной фазы 5%) в газовой среде (при температуре 20°C) по числам Вебера (а): I – капли воды в роли снарядов и суспензий в роли мишеней; II – вода; III – суспензия; IV – данные [19] (1 – коагуляция; 2 – отскок; 3 – разлет; 4 – дробление). Дополнительно представлены данные (б) для иллюстрации роли температуры газовой среды на характеристики взаимодействия капель суспензии в виде диаграмм с тремя группами столбцов (для воздуха с температурой 20°C (I), 500°C (II) и продуктов сгорания с температурой 800–850°C (III)).

ты определяют вид полученных с применением углового и линейного параметров соударений карт режимов взаимодействия (рис. 5). Изменение значений параметров β и B в диапазоне от 0 до 1 позволяет изучить влияние всех возможных схем соударений на последствия взаимодействия и условия реализации того или иного режима.

Отличие условий взаимодействия капель в составе аэрозоля и при идеализированных условиях контакта двух капель. Видеограммы экспериментов показали, что при движении в составе аэрозоля (особенно при высокой относительной концентрации фрагментов жидкости в газовой среде) капли вследствие интенсивных взаимодействий непрерывно трансформируются. Можно сделать вывод о синергетическом эффекте влияния капель на условия их движения в газовом потоке. Этот фактор усиливает взаимодействие последних. Так как углы атаки, размеры и скорости движения меняются в широких диапазонах, то регистрировались определенные отличия (рассеяние значений) ключевых характеристик столкновений (формировалась статистическая база на основе проведенных экспериментов). Даже при идентичных условиях полета в составе аэрозоля и при регистрации соударений индивидуальных капель можно было видеть существенные отличия не только по динамике столкновения, но и типичным последствиям. Для случаев движения в составе аэрозоля наблюдались условия более значительной трансформации поверхности, скорее всего, вследствие непрерывных касаний с другими соседними каплями.

Предельные значения чисел Вебера, необходимые для распада капли при ускоренном ее движении в целом должны быть существенно выше, чем аналогичные значения при соударении капель. Можно было ожидать наиболее заметную роль данного эффекта в случае неоднородных по составу капель вследствие достаточно сложных несферических форм в широком диапазоне варьирования основных параметров. При интенсивном нагреве капель также должен сказываться фактор тепловой защиты капли вследствие образования парового слоя вокруг последней. Проведенные эксперименты показали, что эти отличия заметны лишь для условия дробления капель (при коагуляции и разлете переходные числа Вебера несущественно отличались для капель воды и суспензий). В частности, из известных работ по изучению процессов трансформа-

ции движущихся капель [15–17] можно сделать вывод о том, что динамика разрушения капли в процессе полета зависит от предельных чисел Вебера. При $10 < We < 15$ реализуется так называемый вибрационный или вращательный тип измельчения [17]. Может образовываться небольшое число фрагментов жидкости с разными размерами. Этот же диапазон хорошо соответствует разлету капель при соударениях (также образуется малое число фрагментов жидкости). Для диапазона $20 < We < 40$ характерны условия образования “парашютов” [17] из движущихся капель и их распад с образованием облака мелких струек и цепочек. При $50 < We < 70$ образуются “парашюты со струйкой”. При $10^2 < We < 10^3$ реализуются условия срыва или сдвига поверхностного слоя, а для $10^3 < We < 5 \times 10^4$ характерны условия взрывного (нередко используют термин “катастрофического” [17]) измельчения движущихся капель. При этом динамика разрушения капель существенно связана не только с критическими значениями чисел Вебера, но и чисел Рейнольдса, характеризующими режим движения газового потока [15–17]. Обработка результатов проведенных опытов показала, что при взаимодействии капель для получения облака мелких фрагментов жидкости не требуются значения $We > 100$. Чаще всего даже при $50 < We < 80$ реализовывались соударения с образованием облака мелких капель. При сравнении воды и суспензий можно было сделать вывод о том, что эти минимальные значения We для дробления капель суспензий могут быть ниже на 7–15% в зависимости от концентрации дисперсной фазы. В целом смешивание неоднородных и однородных капельных потоков способствует более интенсивному измельчению фрагментов жидкости.

Температура газовой среды. Проведенные эксперименты показали, что этот фактор особенно интенсифицировал реализацию двух из четырех исследованных режимов взаимодействия капель: отскок при малых скоростях движения и размерах последних, дробление при высоких значениях этих параметров. На рис. 4 и 6 хорошо виден вклад данного фактора в процесс изменения структуры аэрозольного облака за счет отскоков и измельчения капель. Интенсификация отскока связана с существенным ростом скоростей испарения капель воды и суспензии, особенно при повышении температуры (хорошо известны экспоненциальные зависимости этих параметров). На-

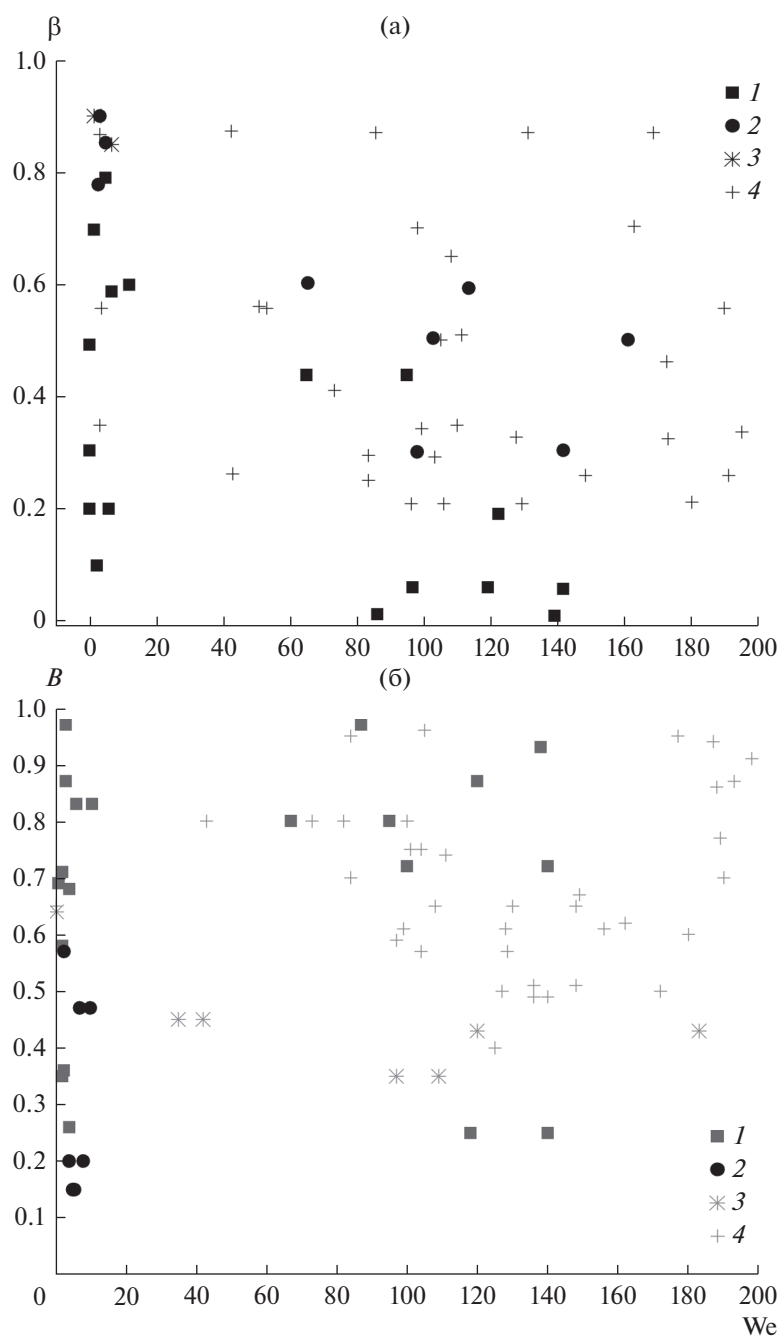


Рис. 5. Карты режимов соударений (1 – коагуляция, 2 – отскок, 3 – разлет, 4 – дробление) капель исследованной водоглифитовой суспензии (относительная массовая концентрация дисперсной фазы 5%) с учетом углового (а) и линейного (б) параметров взаимодействия и чисел Вебера.

пример, в статье [7] приведены соответствующие выражения и экспериментальные данные для их обоснования. Наличие твердых включений интенсифицирует прогрев капель за счет их большей теплопроводности и существенно меньшей теплоемкости по сравнению с водой. Поэтому и вода в составе капли суспензии прогревается до более высоких температур. Как следствие, скорости парообразования растут. В таких условиях

формируются достаточно мощные потоки паров воды от поверхности капли. Линейные скорости оттока паров при температуре газов 500–900°C могут достигать 0.05–0.3 м/с (на основе данных [7] можно рассчитать значения этих параметров с учетом связи между линейной скоростью оттока паров и массовой скоростью парообразования через отношение последней к плотности паров). Так как отскок капель при температурах 20–30°C

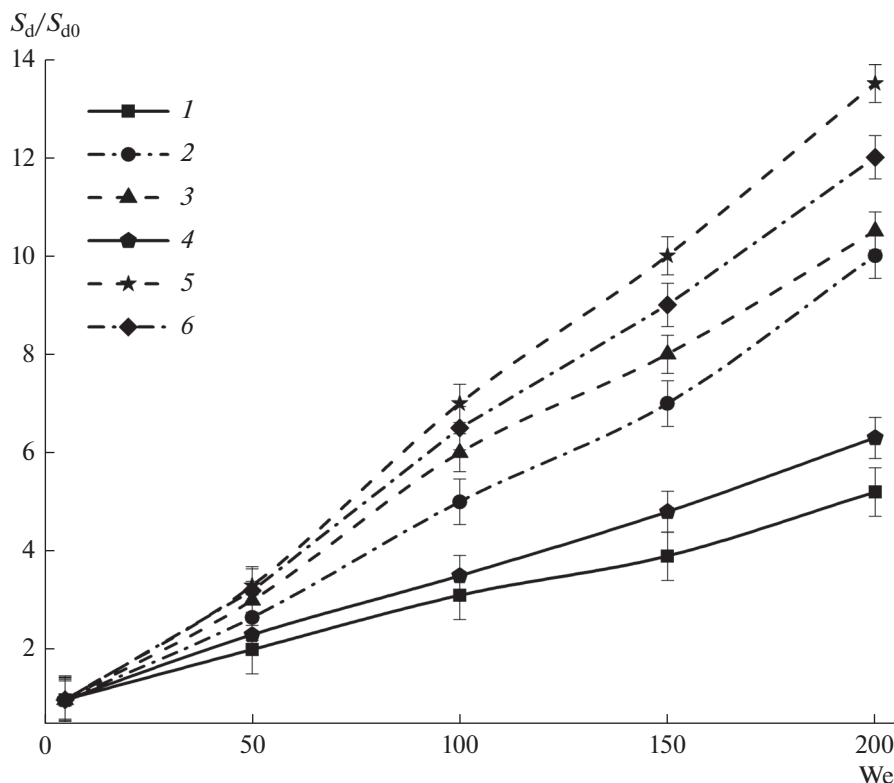


Рис. 6. Результаты оценки потенциального роста количества капель и их суммарной площади поверхности при столкновениях родительских капель (в воздухе с температурой 20°C (1–3), а также потоке продуктов сгорания с температурой 800–850°C (4–6)): 1, 4 – вода; 2, 5 – суспензия–вода; 3, 6 – суспензия. Обобщены данные для всех экспериментов, выполненных с суспензиями при относительной массовой концентрации дисперсной фазы от 0 до 5%.

происходил в условиях сближения капель с относительной скоростью перемещения до 1–1.5 м/с, то вклад вдува паров с рассчитанными скоростями оттока в процесс торможения капель можно считать значительным. Поэтому при высоких температурах газов отскок регистрировался и при начальных относительных скоростях движения капель до 2.3 м/с. Интенсификация же дробления капель суспензий в условиях высоких температур объясняется тремя факторами. Первый связан со снижением поверхностного натяжения воды. Второй состоит в ослаблении связей в приповерхностном слое за счет парообразования. Третий заключается в скоплении твердых частиц в приповерхностном слое капли и их высвобождении за счет испарения воды.

Наиболее ценный результат выполненных исследований заключается в том, что попытки обобщения экспериментальных данных с применением чисел Вебера привели к большому рассеянию характеристик процессов коагуляции, разлета, отскока и дробления капель ($P_1...P_4$). Из анализа данных [19, 20] можно заключить, что даже при использовании карт режимов соударения капель в системах координат, учитывающих так называемые угловой ($\beta = \cos(\alpha_d)$) и линей-

ный ($B = L/(R_{d1} + R_{d2})$) параметры взаимодействия и числа Вебера, вероятностный характер (существенное рассеяние экспериментальных данных как по параметрам режимов соударения, так и по последствиям) сохраняется (рис. 5). Проведенные эксперименты показали, что особенно заметен данный эффект при сравнении воды и суспензии с акцентом на смену роли капель, т.е. мишени и снаряда (карты режимов соударений аналогичны приведенным на рис. 5, но в идентичных диапазонах изменения β , B , We регистрировались одновременно не 1–2, а даже 3 режима столкновений). В целом для снаряда в любом случае регистрировались большие значения We , чем для мишени, так как традиционно принято считать, что снарядом является капля, движущаяся с большей скоростью. При сравнении капель воды и суспензий более динамичные условия взаимодействия, т.е. с большим числом образующихся мелких фрагментов жидкости, регистрировались при соударении капель-снарядов суспензий с каплями-мишенями воды. Это обусловлено большей плотностью и вязкостью первых (они разбивают капли воды, с которыми сталкиваются).

Установлено, что чем больше концентрация и размеры элементов дисперсной фазы в капле, тем

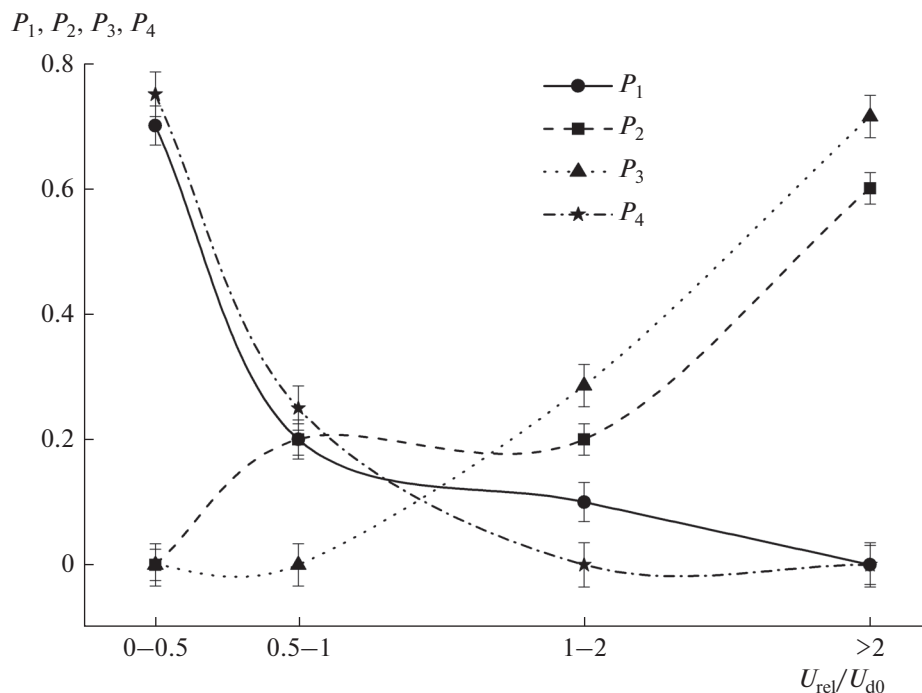


Рис. 7. Отличия характеристик столкновений капель суспензии (относительная массовая концентрация дисперсной фазы 5%) при варьировании относительной скорости их движения. Для обезразмеривания скорости учитывался масштаб, соответствующий 1 м/с.

значительнее ее монолитность. Важную роль играют приповерхностные слои взаимодействующих капель. В частности, при соударении с областью (например, нижняя часть) капли, содержащей агломерат твердых частиц, регистрировался разлет с достаточно медленным последующим распадом остальных фрагментов, содержащих твердые частицы. Лишь при высоких скоростях движения капель (выше 5–7 м/с) соударение капли воды с таким агломератом приводило к образованию мелкодисперсного аэрозоля. Если же взаимодействие капли воды происходило с верхней частью капли суспензии, в которой концентрировалось небольшое число твердых частиц, то условия распада или коагуляции хорошо соответствовали опытам с водой без включений. При высоких скоростях движения такое соударение приводило к отрыву нижней части капли суспензии и ее сильному закручиванию. Вследствие высокой концентрации твердых частиц в этом фрагменте капли и большой вращательной скорости все последующие столкновения с ним капель воды приводили к разлету или дроблению элементов жидкостного аэрозоля. При этом каждое последующее столкновение способствовало росту числа таких вращающихся элементов в аэрозоле и интенсифицировало соударения.

С целью получения зависимостей, представленных на рис. 6 и 7, разработан специализированный алгоритм вычисления (на базе программных

комплексов Tema Automotive и Mathematica) числа капель и суммарных площадей их поверхности, который состоит в маркировании сближающихся фрагментов жидкости, определении их контуров и поверхности по отличию светимости в сравнении с фоновым изображением, вычислении размеров и скоростей движения, углов взаимодействия, расчете числа, размеров и суммарной площади поверхности образующихся фрагментов жидкости, сравнении последнего параметра с аналогичным до взаимодействия.

Результаты выполненных экспериментов представляют высокий интерес для группы химических, нефтехимических и теплообменных приложений в области распыления жидкостей, растворов, эмульсий и суспензий (особенно в условиях высоких температур газов), например, в камерах термической очистки жидкостей, контактных теплообменниках, топливных композиционных системах. Но, несмотря на обоснованную перспективность таких систем, их развитие ограничивается недостатком экспериментальной информации о происходящих в них гидродинамических процессах. Особенно можно отметить системы так называемого вторичного распыления (измельчения), которые могут создаваться при изменении размеров капель жидкостей непосредственно в технологических камерах после впрыска. Анализ литературы (например, [1–7]) и проведенных опытов показывает, что обеспечить

эффективное вторичное (дополнительное) распыление жидкости можно за счет разных механизмов, в частности теплового (перегрева низкокипящего компонента неоднородных капель, роста пузырей и последующего их схлопывания), динамического (дробления вследствие ускорения) и контактного (разлета или дробления при соударениях). Приведенные на рис. 6 и 7 экспериментальные данные показывают, что последний фактор может привести к существенному измельчению капель. При этом для неоднородных капель рост отношений площадей был более значительным. Поэтому можно сформулировать гипотезу о том, что при потенциальном синергетическом эффекте, скорее всего, обеспечатся условия кратного роста площади поверхности жидкости вследствие дробления сталкивающихся разогретых неоднородных капель. К сожалению, на разработанном стенде (рис. 1) данную гипотезу невозможно проверить вследствие малых времен пребывания капель в области регистрации (процессы дробления могут продолжиться и после выхода капль из области видеорегистрации). Для обеспечения перегрева неоднородных капель до условий фрагментации низкокипящего компонента необходимы либо большие температуры нагрева, либо рост времени витания сталкивающихся капль до взаимодействия. Сформулированная задача является одной из наиболее перспективных в будущих исследованиях, если судить по результатам настоящей работы и данным [17–20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные экспериментальные результаты сравнительного анализа характеристик взаимодействия однородных (вода) и неоднородных (суспензии) капль при соударениях в условиях разных температур нагрева газовой среды получены при применении двух подходов (феноменологический и статистический). Они обеспечивают возможность изучения взаимодействия единичных капль или большой группы элементов аэрозоля при вычислении соответствующих характеристик процессов. Первый подход позволил изучить отличия основных физических процессов взаимодействия, а второй — определить характеристики коагуляции, разлета и дробления для типичных газопарокапельных приложений.

Изучение видеogramм экспериментов, а также критериальная обработка результатов проведенных опытов позволили заключить, что даже основные особенности взаимодействия неоднородных капль сложно описать с использованием только чисел Вебера, Лапласа или Стокса. Важно в дальнейшем при развитии соответствующих моделей сформулировать обобщенные критерии, которые учитывают все изученные в проведенных экспериментах факторы: размеры, скорости дви-

жения, углы взаимодействия, состав капль, их роли — мишень или снаряд, температуру и скорость движения газов. Перспективная задача — построение пространственных полей изменения ключевых параметров для иллюстрации условий, при которых будут реализовываться отскок, разлет, дробление и коагуляция однородных (например, вода) и существенно неоднородных (суспензии и другие разновидности смесей) капль.

При столкновениях капль воды и суспензий можно увеличить эффективную площадь поверхности фрагментов жидкости в среднем более чем в 5 раз. При повышении температуры газов последствия столкновений капль могут изменяться за счет интенсивного испарения и уменьшения размеров перед столкновениями. Это способствует образованию большего числа мелких капль, и, как следствие, суммарная площадь поверхности распыляемой жидкости может увеличиться даже в 10 раз и более. Особенно хорошо проявляются такие эффекты при изучении взаимодействий неоднородных капль. При учете результатов кратного роста числа образующихся фрагментов при взрывном измельчении вскипающих неоднородных капль можно сформулировать гипотезу о потенциальном синергетическом эффекте от столкновений последних в высокотемпературных газовых потоках.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-71-10002).

ОБОЗНАЧЕНИЯ

B	безразмерный линейный параметр взаимодействия
L	прицельное расстояние между центрами капль, используемое для расчета линейного параметра взаимодействия последних, мм
P_1, P_2, P_3, P_4	относительные частоты реализации коагуляции, разлета, дробления и отскока капль
R_{d1}, R_{d2}	радиусы взаимодействующих капль, мм
S_{d0}, S_d	суммарная площадь поверхности капль до и после взаимодействия, m^2
U_{d0}	номинальная скорость, используемая в качестве масштабного коэффициента для приведения результатов к безразмерному виду, m/s
U_{d1}, U_{d2}	скорости движения взаимодействующих капль, m/s
U_{rel}	относительная скорость движения капль, m/s

U_g	скорость движения газового (воздушного) потока, м/с
α_d	угол атаки, град
β	безразмерный угловой параметр взаимодействия
ρ	плотность, кг/м ³
σ	поверхностное натяжение, кг/с ²
We	число Вебера

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Babak V.N. Simultaneous heat and momentum transfer in two-phase systems at low pressure and high temperature: vapor phase // Theor. Found. Chem. Eng. 2005. V. 39. № 3. P. 232. [Бабак В.Н. Совместный перенос тепла и импульса в двухфазных системах при пониженном давлении и высоких температурах. Паровая фаза // Теор. осн. хим. технол. 2005. Т. 39. № 3. С. 251.]
2. Shilyaev M.I., Khromova E.M. Simulation of heat and mass transfer in spray chambers // Theor. Found. Chem. Eng. 2008. V. 42. № 4. P. 404. [Шильяев М.И., Хромова Е.М. Моделирование процесса тепломассообмена в оросительных камерах // Теор. осн. хим. технол. 2008. Т. 42. № 4. С. 419.]
3. Suzuki Y., Harada T., Watanabe H., Shoji M., Matsushita Y., Aoki H., Miura T. Visualization of aggregation process of dispersed water droplets and the effect of aggregation on secondary atomization of emulsified fuel droplets // Proc. Combust. Inst. 2011. V. 33. № 2. P. 2063.
4. Yin Z., Nau P., Meier W. Responses of combustor surface temperature to flame shape transitions in a turbulent bi-stable swirl flame // Exp. Therm. Fluid Sci. 2017. V. 82. P. 50.
5. Strizhak P.A., Volkov R.S., Piskunov M.V., Zabelin M.V. Transformation of water ball falling in high-temperature gases // Atomization Sprays. 2017. V. 27. № 10. P. 893.
6. Tarlet D., Allouis C., Bellettre J. The balance between surface and kinetic energies within an optimal micro-explosion // Int. J. Therm. Sci. 2016. V. 107. P. 179.
7. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Volkov R.S., Vysokomornaya O.V. Integral characteristics of water droplet evaporation in high temperature combustion products of typical flammable liquids using SP and IPI methods // Int. J. Therm. Sci. 2016. V. 108. P. 218.
8. Khan M.Y., Karim Z.A.A., Aziz A.R.A., Heikal M.R., Crua C. Puffing and Microexplosion Behavior of Water in Pure Diesel Emulsion Droplets During Leidenfrost Effect // Combust. Sci. Technol. 2017. V. 189. P. 1186.
9. Mura E., Josset C., Loubar K., Huchet G., Bellettre J. Effect of dispersed water droplet size in microexplosion phenomenon for water in oil emulsion // Atomization Sprays. 2010. V. 20. P. 791.
10. Ithnin A.M., Noge H., Kadir H.A., Jazair W. An overview of utilizing water-in-diesel emulsion fuel in diesel engine and its potential research study // J. Energy Inst. 2014. V. 87. P. 273.
11. Kim A.V., Medvedev N.N., Geiger A. Molecular dynamics study of the volumetric and hydrophobic properties of the amphiphilic molecule C8E6 // J. Mol. Liq. 2014. V. 189. P. 74.
12. Yao S.C., Manwani P. Burning of suspended coal-water slurry droplet with oil as combustion additive // Combust. Flame. 1986. V. 66. № 1. P. 87.
13. Saito M., Sadakata M., Sakai T. Single droplet combustion of coal-oil/methanol/water mixtures // Fuel. 1983. V. 62. № 12. P. 1481.
14. Wang H., Guo S., Yang L., Guo Y., Jiang X., Wu S. Surface morphology and porosity evolution of CWS spheres from a bench-scale fluidized bed // Energy Fuels. 2015. V. 29. № 5. P. 3428.
15. Sprittles J.E., Shikhmurzaev Y.D. Coalescence of liquid drops: Different models versus experiment // Phys. Fluids. 2012. V. 24. № 12. P. 122105.
16. Eggers J., Villermaux E. Physics of liquid jets // Rep. Prog. Phys. 2008. V. 71. Article ID 036601.
17. Седов Л.И. Механика жидкости и газа // Итоги науки и техники. М.: ВИНТИ, 1982. Т. 17. С. 116.
18. Antonov D.V., Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Experimental study of the effects of collision of water droplets in a flow of high-temperature gases // J. Eng. Phys. Thermophys. 2016. V. 89. № 1. P. 100.
19. Архипов В.А., Ратанов Г.С., Трофимов В.Ф. Экспериментальное исследование взаимодействия капель при столкновениях // Прикл. мех. тех. физ. 1978. № 2. С. 73.
20. Pawar S.K., Henrikson F., Finotello G., Padding J.T., Deen N.G., Jongsma A., Innings F., Kuipers J.A.M.H. An experimental study of droplet-particle collisions // Powder Technol. 2016. V. 300. P. 157.