

УДК 532.6

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ КАПЕЛЬ И БОЛЬШОЙ СОВОКУПНОСТИ ПОСЛЕДНИХ В СОСТАВЕ АЭРОЗОЛЬНОГО ОБЛАКА

О. В. Высокоморная^{1,*}, академик РАН А. К. Ребров²,
П. А. Стрижак^{1,**}, Н. Е. Шлегель¹

Поступило 15.10.2018 г.

Представлен сравнительный анализ экспериментальных результатов, полученных разными исследованиями с использованием двух различных экспериментальных подходов: феноменологического (регистрация условий, характеристик и режимов взаимодействия капли-снаряда и капли-мишени) и статического (анализ процессов столкновений десятков и даже сотен капель жидкостей в составе аэрозоля). Установлены диапазоны значений критерия Вебера (базового параметра, используемого для анализа последствий столкновений капель в газовой среде), соответствующие отскоку, коагуляции, разлёту, дроблению по результатам всех рассмотренных экспериментальных работ.

Ключевые слова: капля, аэрозольный поток, столкновение, отскок, коагуляция, разлёт, дробление, критерий Вебера.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-5652485138-43>

ВВЕДЕНИЕ

Эффекты коагуляции, дробления и фрагментации капель жидкостей существенно влияют на характеристики многофазных и многокомпонентных потоков, которые активно применяются в группе перспективных ресурсосберегающих газопарокапельных технологий [1–3]. Эти технологии основаны на движении элементов многофазных и многокомпонентных сред по сложным траекториям и в разных тепловых условиях [3–5]. Их объединяют [3] слабо изученные эффекты отскока, коагуляции, дробления и фрагментации капель, которые оказывают существенное влияние на структуру и свойства многофазных и многокомпонентных сред [6–10].

К настоящему времени известны результаты экспериментов по изучению упомянутых эффектов, выполненных с применением двух существенно различающихся подходов [6–12]. Первый (феноменологический) [8, 9, 11, 12] основан на регистрации условий, характеристик и режимов взаимодействия двух капель (первая — мишень, вторая — снаряд), а второй (статистический) [6, 7, 10] предполагает статистический анализ процессов столкновений десятков и даже сотен капель жидкостей в составе

аэрозоля. В результате применения двух указанных подходов предприняты попытки обобщения экспериментальных данных с использованием современной теории взаимодействия капель жидкостей [10–12]. Однако пока недостаточно экспериментальной информации для достоверного прогнозирования характеристик соответствующих процессов и повышения эффективности газопарокапельных технологий (особенно в условиях высоких температур, способствующих интенсификации изменения состава и структуры газопарокапельных смесей).

Цель настоящей работы — определение различий количественных значений характеристик режимов взаимодействия капель воды в газовой среде за счёт анализа известных экспериментальных данных и при проведении опытов с использованием двух указанных подходов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Аналогично опытам [6, 7] применялся стенд, позволяющий регистрировать условия и характеристики процессов смешения встречно направленных капельного и газового потоков с варьируемой температурой, структурой и составом получаемой газопарокапельной смеси. В настоящей работе основное внимание уделено высокоскоростной видеорегистрации процессов столкновений капель в составе аэрозоля. Для этого применялось специализированное программное обеспечение Tema Automotive, позволяющее выполнять непрерывное

¹ *Национальный исследовательский
Томский политехнический университет*

² *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск*

*E-mail: vysokomornaja@tpu.ru

**E-mail: pavelspa@tpu.ru

слежение за перемещающимися каплями. Параметры потока капель: начальные размеры $R_d = 0,1-1$ мм; относительная объёмная концентрация $\gamma_d = 0,001-0,0012$ м³ каплей жидкости на 1 м³ газа; максимальная скорость движения капель $U_d = 10$ м/с. Параметры газового потока: температура $T_g = 20-900$ °С (воздух или продукты сгорания керосина), максимальная скорость движения $U_g = 10$ м/с. Для контроля U_g использовался оптический метод PIV, U_d — метод PTV. Погрешности определения скоростей U_g и U_d не превышали 1,6%.

Аналогично экспериментам [6, 7] исследования проводили для капель полидисперсного водяного потока. Размеры капель R_d измеряли с использованием метода IPI, регистрирующего размеры сферических и каплевидных тел по среднему радиусу или диаметру. Систематические погрешности определения R_d не превышали 2,1%. Также при обработке видеogramм экспериментов определяли углы пересечения траекторий движения капель α в момент их столкновения с использованием специализированного программного обеспечения и параметрической сетки на видеogramмах.

В отличие от опытов [6, 7], в настоящей работе при обработке результатов опытов одновременно учитывали кадры видеogramм, полученные с применением двух камер, расположенных перпендикулярно друг другу. Это позволяло более достоверно регистрировать не только угол между траекториями перемещения капель, но и последствия распада последних. Кроме того, в отличие от экспериментов [6, 7], было обработано более чем 500 кадров для формирования минимальной статистической базы характеристик и режимов взаимодействия капель. Также проводили опыты с направлением двух капилляров (устанавливались вместо форсуночных устройств) под варьируемым углом с целью уточнения результатов опытов с аэрозолем.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В известных экспериментальных работах [8–10], посвящённых исследованию характеристик постановочных столкновений двух капель (так называемых мишени и снаряда), выделяются пять основных режимов: 1) слияние (коагуляция) двух капель в одну более крупную; 2) отскок капель друг от друга (взаимодействие через газовую или паровую прослойку между каплями); 3) кратковременное слияние с последующим разрушением; 4) пробивание мишени снарядом с образованием нескольких крупных вторичных капель; 5) взрывное дробление первичных капель с образованием множества мелких

вторичных капель. При этом авторы [8–10] по результатам своих исследований формулируют достаточно строгие диапазоны значений основного критерия — числа Вебера We , в которых прогнозируют лишь один из возможных режимов столкновения с нулевой вероятностью возникновения других.

Эксперименты с выборкой и анализом столкновений двух капель в аэрозольном потоке позволили выделить следующие режимы взаимодействия: коагуляция, отскок, разлёт, дробление (рис. 1). При проведении настоящего исследования, а также более ранних опытов с анализом режимов взаимодействия двух капель в аэрозольном потоке было отмечено, что при определённых соотношениях размеров капель и их скоростей вероятность возникновения одного из режимов может являться преобладающей и не исключает возможности реализации других.

Также следует отметить и то, что схожим по описанию режимам взаимодействия капель в постановочных экспериментах и опытах с аэрозолем соответствуют разные диапазоны значений We . Сравнительные данные о соотношении числа Вебера и вероятности возникновения каждого из режимов взаимодействия при столкновениях представлены в табл. 1.

Приведённые в табл. 1 данные дают возможность сформулировать достаточно ограниченные диапазоны изменения значений We , которые соответствовали бы одному из выделенных режимов взаимодействия капель воды во всех проанализированных работах. Достоверно (т.е. относительная вероятность близка к единице) наблюдать отскок капель при столкновении можно в условиях $We = 0,35-0,5$. Вероятность коагуляции капель максимальна в диапазоне $We = 1-7,5$; достоверно прогнозировать разлёт можно при $We = 15-50$. Дробление капель чаще всего возникает при значениях $We > 50$, однако даже в этих условиях вероятность такого режима по данным проведённых экспериментов составляет около 30%. Отличия экспериментальных результатов настоящей работы и авторов [6–10] объясняются разными подходами при планировании и проведении исследований: воспроизведение столкновений двух капель путём наведения капли-снаряда на каплю-мишень и условия взаимодействия капель как элементов распылённой жидкости в газовом потоке. Условия в опытах со столкновением мишеней и снарядов [8–10] можно считать несколько идеализированными, исключая взаимное влияние множества соседних капель при движении в аэрозольном потоке (сложные траектории, меняющиеся концентрации и формы капель, смещения центров масс, накладывание траекторий движения, изменение

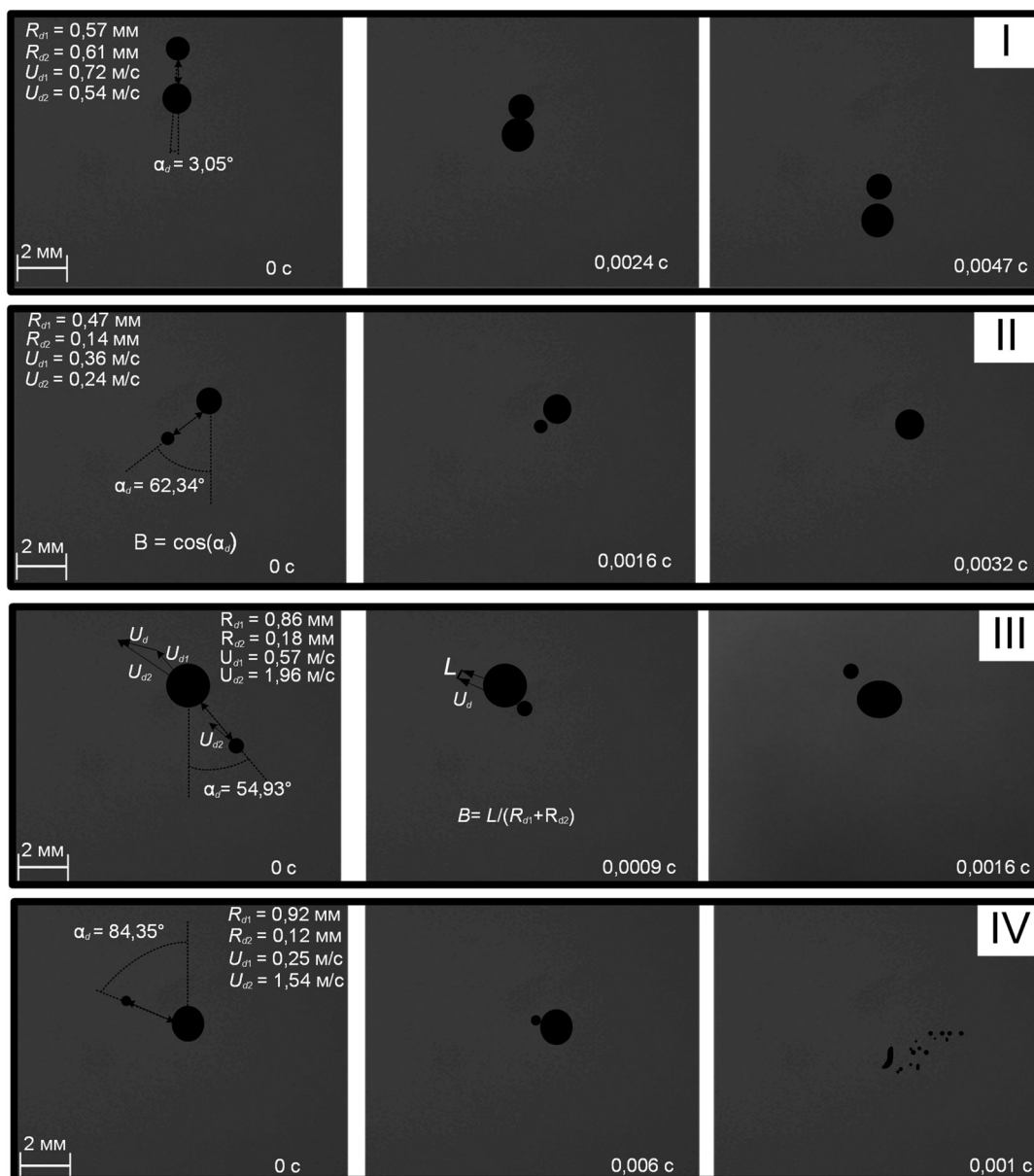


Рис. 1. Типичные кадры с иллюстрацией четырёх основных режимов взаимодействия капель воды в газовой среде при их столкновении: I — отскок, II — коагуляция, III — разлёт, IV — дробление.

скорости диффузии и конвекции, формирование температурных и аэродинамических следов, меняющееся давление в окрестности капель и т.д.). Эксперименты, описанные в работах [6, 7], более приближены к реальным процессам, протекающим в аэрозольных технологиях. Однако и их результаты нельзя считать полностью учитывающими всю совокупность значимых факторов, влияющих на характеристики столкновений капель жидкостей при движении в газовых средах. Важнейшей характеристикой сталкивающихся капель является их форма, которая циклически меняется в процессе движения и может насчитывать до 10 разновидностей (“сфера”, “блин”, “эллипс”, “парашют”, “зонт”

и пр.). Вероятно, не менее существенное влияние на последствия столкновений капель оказывают и такие факторы, как угол между векторами их скоростей, концентрация капель в единице объёма, состав распылённой жидкости, наличие фазового перехода и др.

В качестве углового параметра взаимодействия капель в настоящей работе использован $\beta = \cos \alpha_d$, где α_d — угол атаки. Также при обработке видеogramм экспериментов вычисляли относительный линейный параметр взаимодействия капель $B = L / (R_{d1} + R_{d2})$, где L — расстояние между центрами масс капель, м; R_{d1} и R_{d2} — радиусы сталкивающихся капель, м. Параметр B косвенно позволяет учитывать

Таблица 1. Соответствие значений критерия Вебера и относительных вероятностей реализации режимов взаимодействия двух капель при их столкновениях

Последствие столкновения	We, P			
	[8, 9]	[10]	[6, 7]	Данные настоящей работы
Отскок	$0 < We < 0,5, P = 1$	$0,35 < We < 0,7, P = 1$	—	$0,03 < We < 1,7, P = 0,24$
Коагуляция	$0,7 < We < 15, P = 1$	$1 < We < 7,5, P = 1$	$We = 0,2, P = 0-0,2$ $0,16 < We < 0,19, P = 0,2-0,4$ $0,156 < We < 0,16, P = 0,4-0,6$ $0,107 < We < 0,156, P = 0,6-0,8$ $0,067 < We < 0,107, P = 0,8-1$	$0 < We < 15, P = 0,98$ $15 < We < 50, P = 0,67$ $50 < We < 100, P = 0,15$ $We > 100, P = 0,29$
Разлёт	$15 < We < 100, P = 1$	$7,5 < We < 50, P = 1$	$0,113 < We < 0,181, P = 0-0,1$ $0,181 < We < 0,257, P = 0,1-0,2$ $0,257 < We < 0,264, P = 0,2-0,3$ $0,264 < We < 0,329, P = 0-0,1$ $0,329 < We < 0,34, P = 0,3-0,4$	$0 < We < 15, P = 0,004$ $15 < We < 50, P = 0,31$ $50 < We < 100, P = 0,84$ $We > 100, P = 0,43$
Дробление	$We > 100, P = 1$	$We > 50, P = 1$	$0,13 < We < 0,217, P = 0-0,2$ $0,217 < We < 0,32, P = 0,2-0,4$ $0,32 < We < 0,39, P = 0,4-0,6$	$0 < We < 15, P = 0,016$ $15 < We < 50, P = 0,02$ $50 < We < 100, P = 0,1$ $We > 100, P = 0,28$

влияние количества и концентрации капель в потоке на последствия их столкновений. Также можно предположить, что вклад скорости и размера капель (две основные характеристики для вычисления параметра We) не равноценен при прогнозировании режимов их взаимодействия. Это предположение подтверждают данные, приведённые на рис. 2 и 3, — диапазоны возникновения каждого из четырёх ключевых режимов взаимодействия существенно различаются при варьировании скорости движения капель и постоянстве их диаметра, и наоборот. Полученные экспериментальные результаты позволяют также сформулировать предположение о существенной роли относительной скорости с учётом значений U_{d1}

и U_{d2} , а также соотношения радиусов R_{d1}/R_{d2} капель при их взаимодействии. В частности, при идентичных значениях We результатом столкновения крупных капель является коагуляция, а более мелких, но с большей скоростью — интенсивное дробление. Соответствующие трём режимам (коагуляция, разлёт, дробление) области в системе координат $B(We)$ и $\beta(We)$ существенно различаются при условиях варьирования только R_d или U_d (лишь отскоку соответствуют ограниченные диапазоны изменения B, β, We). И коагуляция, и дробление заметно изменяют структуру газопарокапельного потока, поэтому важно корректно строить карты режимов взаимодействия (рис. 2, 3) и определять области устойчивой

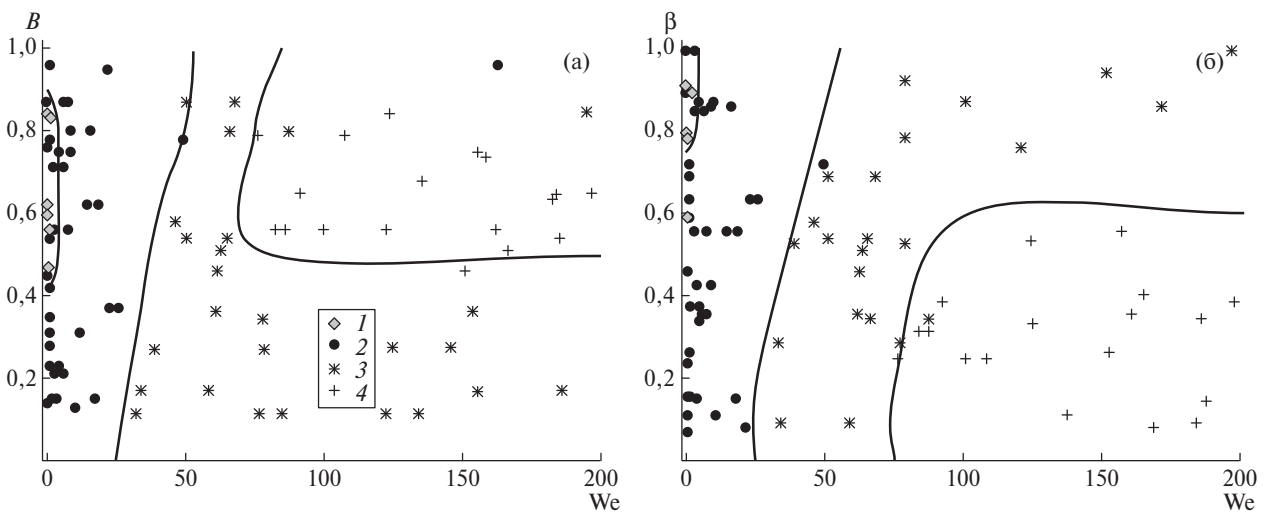


Рис. 2. Карта режимов взаимодействия капель с учётом углового (а) и линейного (б) параметров их соударения и числа We ($R_d = \text{const}, U = \text{var}$) при постоянстве среднего размера R_d . Здесь и на рис. 3: 1 — отскок; 2 — коагуляция; 3 — разлёт; 4 — дробление.

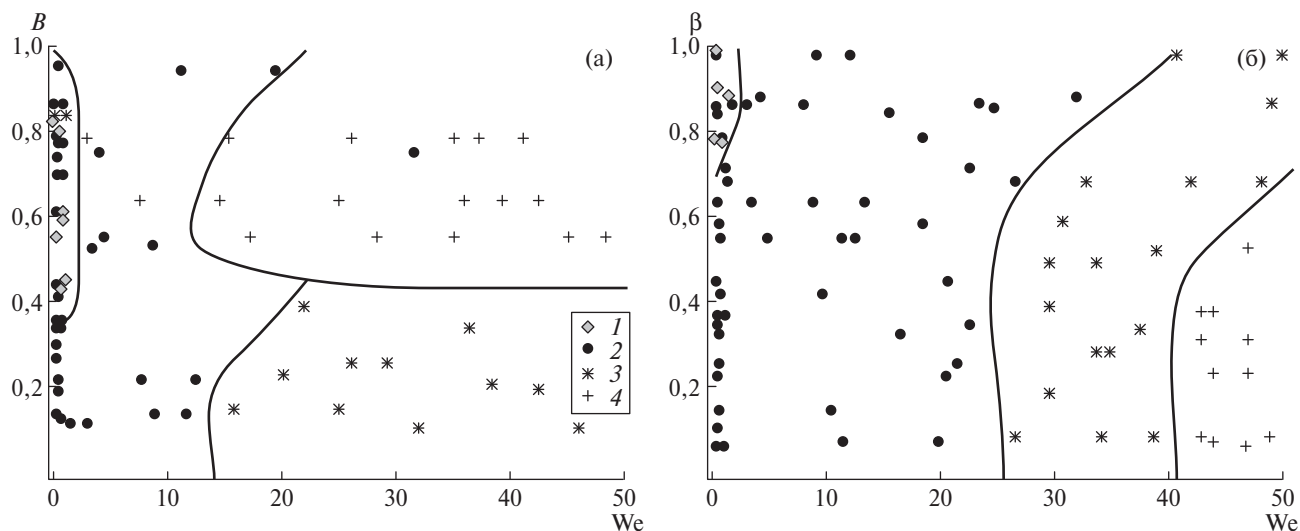


Рис. 3. Карта режимов взаимодействия капель с учётом углового (а) и линейного (б) параметров их соударения и числа We ($U_d = \text{const}$, $R_d = \text{var}$) при постоянстве скорости движения U_d .

реализации каждого из четырёх режимов. Учитывать лишь диапазон изменения числа Вебера, как показано в табл. 1, недостаточно (важно принимать во внимание роль B и β с учётом разномасштабного влияния скорости и размера капель).

Для разработки достоверных прогностических моделей, позволяющих выполнять оценку вероятностей режимов столкновений капель в реальных технологиях, целесообразно исследовать детально все выделенные факторы. При распылении неоднородных жидкостей (растворов, эмульсий, суспензий), часто применяющихся в самых разных технологиях, количество факторов, которые необходимо учитывать при прогнозировании, существенно увеличивается. Поэтому при подобных исследованиях важно использовать подходы и методы, позволяющие наиболее полно оценить масштабы влияния всех значимых факторов, т.е. совместно применять подходы как с аэрозольными потоками, так и с идеализированными столкновениями двух капель.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам даже высокоскоростной видеорегистрации и специализированного программно-аппаратного комплекса слежения в аэрозольном потоке сложно выделить все возможные режимы столкновений капель жидкостей, как в опытах с двумя каплями в идеализированных условиях. Тем не менее условия отскока, коагуляции, дробления и фрагментации сталкивающихся капель можно регистрировать достоверно при варьировании параметров аэрозолей и газов в широких диапазонах. Новизна результатов настоящего исследования состоит в том, что впервые показаны отличия послед-

ствий столкновений капель в условиях, соответствующих реальным газопарокапельным технологиям, от типичных для лабораторных экспериментов. Выполнены экспериментальные оценки влияния углового и линейного параметров взаимодействия капель на вероятность возникновения основных режимов взаимодействия с учётом доминирования влияния размеров и скоростей перемещения капель.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счёт средств РНФ (проект 18–71–10002).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paruchuri S., Brenner M.P. // Phys. Rev. Lett. 2007. V. 98. Article ID134502.
2. Eggers J., Villermaux E. // Rept. Prog. Phys. 2008. V. 71. ID036601.
3. Sprittles J.E., Shikhmurzaev Y.D. // Phys. Fluids. 2012. V. 24. 122105.
4. Varaksin A.Y. // High Temp. 2013. V. 51. P. 377–407.
5. Sazhin S.S. // Fuel. 2017. V. 196. P. 69–101.
6. Кузнецов Г.В., Волков П.С., Стрижак П.А. // Письма в ЖТФ. 2015. Т. 41. № 17. С. 53–60.
7. Антонов Д.В., Волков П.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. // ИФЖ. 2016. Т. 89. № 1. С. 94–103.
8. Архипов В.А., Ратанов Г.С., Трофимов В.Ф. // ПМТФ. 1978. № 2. С. 73–77.
9. Архипов В.А., Васенин И.М., Трофимов В.Ф. // ПМТФ. 1983. № 3. С. 95–98.
10. Пажу Д.Г., Галусто В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984.
11. Orme M. // Prog. Energy Comb. Sci. 1997. V. 23. № 1. P. 65–79.
12. Pawar S.K., Henrikson F., Finotello G., Padding J.T., Deen N.G., Jongsma A., Innings F., Kuipers J.A.M.H. // Powd. Tech. 2016. V. 300. P. 157–163.

A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE INTERACTION REGIMES OF TWO DROPS AND THEIR LARGE POPULATION IN AN AEROSOL CLOUD

**O. V. Vysokomornaya, Academician of the RAS A. K. Rebrov,
P. A. Strizhak, N. E. Shlegel**

Received October 15, 2018

A comparative analysis of experimental results obtained by different researchers using two different experimental approaches is presented: phenomenological (registration of conditions, characteristics and modes of interaction between a drop of a shell and a target drop) and statistical (analysis of collisions of tens and even hundreds of drops of liquids as part of an aerosol). The ranges of Weber criterion values (the basic parameter used for analyzing the effects of collisions of droplets in a gaseous medium) are established, corresponding to bounce, coalescence, reflexive and stretching separation, disruption, according to the results of all considered experimental research. The bounce of droplets upon collision can be observed under the conditions $We = 0.35-0.5$; the probability of droplet coalescence is maximum in the range $We = 1-7.5$; it is possible to reliably predict spreading at $We = 15-50$; splitting of droplets most often occurs at values $We > 50$. The probability of occurrence of other scenarios in the selected We ranges is not zero. The conclusion about the need to combine experimental techniques to obtain the most reliable data and their further use in the development of prognostic models is formulated.

Keywords: drop, aerosol stream, collision, bounce, coalescence, reflexive and stretching separation, disruption, Weber criterion.