

03.1;03.2

Столкновения капель жидкостей и твердых частиц в разогретой газовой среде

© А.Г. Исламова, П.П. Ткаченко, Н.Е. Шлегель, П.А. Стрижак

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
E-mail: agi2@tpu.ru

Поступило в Редакцию 15 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 22 марта 2024 г.

Принято к публикации 28 марта 2024 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик соударений капель водной суспензии с частицами песка в разогретой газовой среде. Построена карта режимов соударений (агломерация, дробление) с учетом вклада сил инерции, поверхностного натяжения и вязкости. Определены условия интенсивной фрагментации капель жидкостей, а также устойчивой агломерации капель и частиц, при которой формируются капли суспензий. Показано, что повышение температуры газовой среды с 20 до 100°C приводит к смещению границы между режимами агломерации и дробления в сторону меньших значений числа Вебера на 30%. Выполнена безразмерная математическая обработка результатов экспериментов. Спрогнозированы условия агломерации и дробления неоднородных капель в многофазных промышленных потоках.

Ключевые слова: соударение, агломерация, дробление, частица, капля.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.14.58301.19893

Столкновение капель жидкостей является важным процессом во многих инженерных и научных приложениях: топливных, химических, оросительных и пищевых [1]. Этот процесс определяет ключевые технологические параметры, такие как распределение размеров капель, степень смешивания, скорость испарения и теплообмен, которые влияют на эффективность и надежность процессов, связанных с данным явлением [2]. При столкновении капель с твердыми частицами возможна реализация различных режимов: агломерация, отскок и разрушение [3,4]. На иницирование этих режимов влияют такие факторы, как характеристики капель и частиц (размер и геометрия), свойства жидкостей, условия окружающей среды [5]. Актуальной задачей является формирование частиц требуемых размеров, свойств и формы поверхности методом термической сушки [6]. Для реализации метода термической сушки используются шламовые реакторы, в которых происходят соударения капель суспензионных жидкостей с твердыми частицами [7]. Основным преимуществом такого метода является возможность получения твердых частиц с требуемым функционалом и свойствами, такими как сыпучесть, поведение при восстановлении, объемная плотность и механическая стабильность [8]. Известны результаты работ [3,4], рассматривающих столкновения капель жидкостей без примесей, а также капель растворов и частиц правильной геометрической формы при нормальных условиях. На практике частицы несимметричны и неоднородны, а температура, при которой они взаимодействуют с каплями жидкости, значительно выше, чем при нормальных условиях. В работах [7–9], посвященных изучению взаимодействия капель жидкостей и твердых частиц в спреях, основное внимание

уделяется интегральным параметрам (средний размер, влажность). В настоящей работе приведены характеристики процессов взаимодействия капель и твердых частиц. Цель работы — определение характеристик взаимодействия капель и частиц в газовой среде при варьировании температуры последней по результатам экспериментальных исследований.

На рис. 1 приведена схема стенда, используемого для изучения столкновения капель и частиц в газовой среде, а также представлены основные регистрируемые характеристики взаимодействия. Соударения капель с частицами регистрировались при помощи высокоскоростной видеокамеры (разрешение 1280 × 1024 px, скорость съемки 5000 fps, межкадровая задержка 1/25 000 s). Для подачи твердых частиц в камеру соударений использовался пескоструйный пистолет с резервуаром. Частицы песка имели фракционный размер менее 1 mm. Песок измельчался в роторной мельнице. Скорость вращения ротора изменялась от 60 до 20 000 rpm в зависимости от необходимой фракции. Измельченный песок просеивался при помощи вибрационного грохота. Для распыления частиц к пескоструйному пистолету подключен компрессор. Для варьирования скорости движения частиц на компрессоре выставлялось давление 2–6 atm. Нагнетатель, подключенный к компрессору, использовался для генерации капель жидкости. Вследствие изменения давления от 2 до 6 atm варьировались скорость движения и размеры капель. В качестве исследуемой жидкости использовалась суспензия на основе воды и песка (вода — 95 wt.%, песок — 5 wt.%). Такое соотношение выбрано с учетом условий и характеристик работы сушильных аппаратов [10]. Процесс смешения компонентов суспензии происходил в

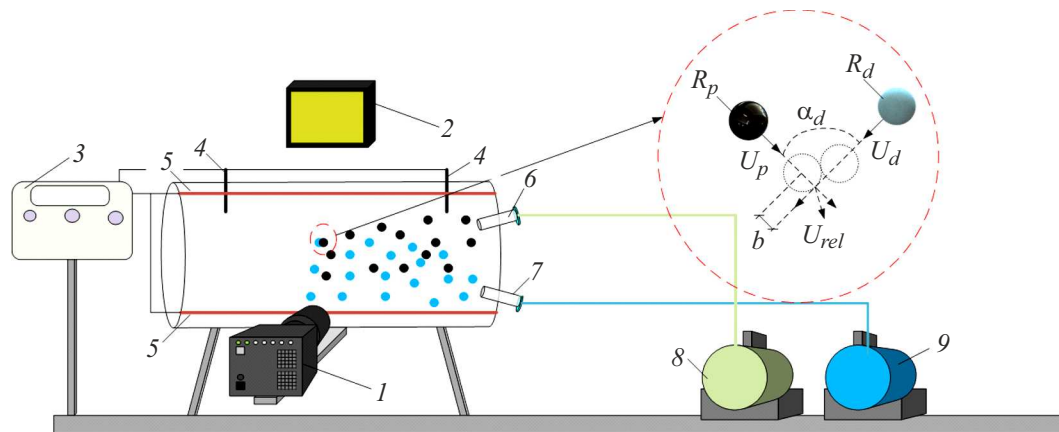


Рис. 1. Стенд для регистрации характеристик соударений потоков жидкости и твердых частиц. 1 — видеокамера, 2 — прожектор, 3 — панель управления, 4 — термопары, 5 — нагреватели, 6 — сопло подачи твердых частиц, 7 — сопло подачи жидкости, 8 — компрессор для подачи твердых частиц, 9 — компрессор для подачи жидкости.

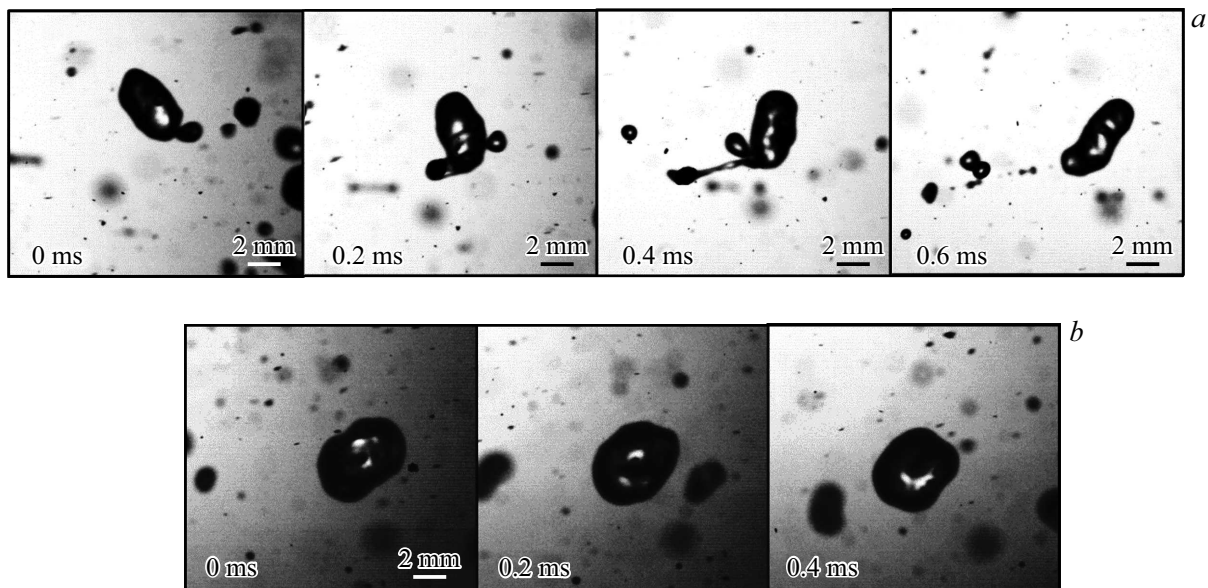


Рис. 2. Кадры, иллюстрирующие процессы соударений капель воды с частицей в аэрозольном потоке. *a* — агломерация, *b* — дробление.

магнитной мешалке при 950 rpm в течение 10 min. Далее состав подавался в реактор. Частицы песка не успевали седиментировать. Они находились во взвешенном состоянии в каплях. Температура газовой среды варьировалась в диапазоне от 20 до 100°C.

В процессе высокоскоростной видеосъемки регистрировались основные параметры процессов взаимодействия капель и частиц: радиусы капель (R_d) и частиц (R_p), скорости движения капель (U_d) и частиц (U_p), угол между траекториями движения капли и частицы (α_d), расстояние между центрами масс частицы и капли (b). Систематическая погрешность измерения размеров капель, их скоростей движения и углов столкновения составила соответственно 2, 4 и 2%. На основании измеренных параметров прово-

дился расчет результирующей скорости взаимодействия капли с частицей $U_{rel} = (U_d^2 + U_p^2 - 2 \cos(\alpha_d) U_d U_p)^{0.5}$. При анализе видеogramм рассчитывалось число Вебера $We = 2\rho R_d U_{rel}^2 / \sigma$. Вычислялся линейный параметр взаимодействия $B = b / (R_d + R_p)$. Величина B может варьироваться в диапазоне от нуля до единицы.

В ходе анализа результатов проведенных экспериментов выделены два режима взаимодействия капель суспензии с частицами песка: агломерация и дробление (рис. 2). Закономерности таких режимов подробно описаны в [11]. Реализация режима агломерации регистрировалась при относительно невысоких результирующих скоростях движения (менее 2 m/s). Частица песка оседала на капле суспензии, вторичные фрагменты не образовывались. С увеличением результирующей скоро-

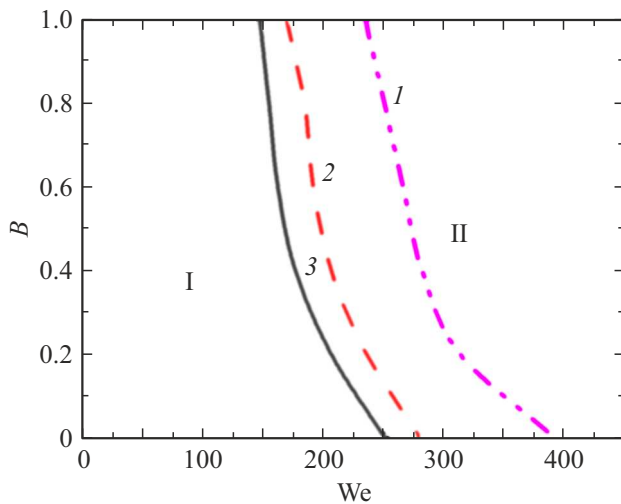


Рис. 3. Карта режимов соударений капель жидкости с твердыми частицами при варьировании температуры окружающей среды: 20 (1), 50 (2) и 100°C (3). I — агломерация, II — дробление.

сти взаимодействия или же размеров капель и частиц происходил переход между режимами агломерации и дробления. Режим дробления протекал с образованием вторичных фрагментов.

На основе анализа видеogramм проведенных экспериментов сделано заключение об определяющем влиянии отношения размеров капель и частиц на режимы и последствия их соударений. Установлено, что чем меньше размеры исходных капель, тем меньше количество формируемых в процессе соударений вторичных фрагментов. Определено, что при измельчении мелких капель требуются меньшие результирующие скорости соударения. И наоборот, рост размеров исходных капель сопровождался повышением требуемых для их распада результирующих скоростей движения. Соответственно увеличение размеров капли приводило к росту необходимого значения числа Вебера для реализации режима дробления. Это обусловлено тем, что капля, имеющая большие размеры, при одинаковых результирующих скоростях движения втягивала в себя частицу. При увеличении же скоростей движения частиц и капель происходила их фрагментация. Также установлено, что при увеличении относительной концентрации капель и частиц с $2 \cdot 10^{-4}$ до $6 \cdot 10^{-4}$ вероятность реализации режима дробления возросла на 10–15%. Это обусловлено деформацией поверхности капель вследствие частых соударений с соседними частицами и каплями. Каждый последующий удар частицы по такой капле приводил к ее измельчению.

По результатам исследований построена карта режимов соударений капель суспензии и твердых частиц песка в аэрозольных потоках (рис. 3).

При построении карты режимов использовался безразмерный линейный параметр взаимодействия B , ко-

торый позволял учесть радиусы капель и частиц, а также центричность соударения. Число Вебера позволяло учесть силы инерции и поверхностного натяжения, вклад скорости движения и размеров капель. Установлено, что при увеличении температуры газовой среды до 100°C процесс фрагментации капель устойчиво реализовался при меньших значениях числа Вебера (на 20–30%), чем в случае температуры окружающей среды 20°C. Этот эффект связан с тем, что капли прогревались в газовой среде. При нагреве жидкости снижались силы поверхностного натяжения пленки на поверхности, и для ее разрушения требовались меньшие значения начальных скоростей движения капель и, как следствие, меньшие энергии взаимодействия. С использованием термопар и тепловизионной камеры определены температуры в рабочей камере (рис. 1). Проведенные оценки показали, что капли жидкости успевают прогреваться до 40–60°C в процессе движения от сопла до зоны их соударения. Поверхностное натяжение в таком случае снижалось с 72.69 до 66.37 мН/м, а вязкость — с 1.0 до 0.7 мПа·с. Также интенсификации дробления капли способствовало наличие в ней твердых частиц. Уменьшение поверхностного натяжения жидкости приводило к снижению силы сопротивления внутри капли, действующей на частицы в суспензии. В момент удара частицы „разрывали“ приповерхностные слои капли изнутри вследствие преобладания инерционных сил над силами поверхностного натяжения. Увеличение температуры газовой среды также снижало внешнее сопротивление, капли и частицы имели повышенные скорости взаимодействия (по сравнению с нормальными условиями). Такой эффект приводил к росту числа вторичных фрагментов при дроблении капли. Проведенные эксперименты показали, что повышение температуры газовой среды способствовало снижению размеров вторичных фрагментов. Это обусловлено интенсификацией фазовых превращений.

В диапазоне исследуемых температур газовой среды при столкновении капель суспензии с твердыми частицами паровая буферная зона не зарегистрирована. В [12] показано, что при увеличении температуры газовой среды выше 400°C формируется буферная паровая зона вокруг капли. Она препятствует сближению капель и интенсифицирует их отталкивание вследствие противоположно направленных потоков водяного пара с поверхности капель. При температурах газовой среды 20–100°C границы режимов соударений капель на карте зависят от влияния тепловых условий на свойства жидкостей.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-71-10040 (<https://rscf.ru/project/23-71-10040/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Ю.Д. Чашечкин, В.Е. Прохоров, *ЖТФ*, **93** (11), 1539 (2023). DOI: 10.61011/JTF.2023.11.56485.151-23 [Yu.D. Chashechkin, V.E. Prokhorov, *Tech. Phys.*, **68** (11), 1431 (2023)].
- [2] S. Suo, M. Jia, H. Liu, T. Wang, *Int. J. Multiphase Flow*, **137**, 103581 (2021). DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103581
- [3] H. Kan, H. Nakamura, S. Watano, *Adv. Powder Technol.*, **29**, 1317 (2018). DOI: 10.1016/j.appt.2018.02.026
- [4] Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак, *Письма в ЖТФ*, **45** (6), 23 (2019). DOI: 10.21883/pjtf.2019.06.47494.17497 [G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, *Tech. Phys. Lett.*, **45** (3), 267 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019030301].
- [5] D. Pan, N. Phan-Thien, B.C. Khoo, *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, **212**, 63 (2014). DOI: 10.1016/j.jnnfm.2014.08.011
- [6] H. Yang, A. Chen, S. Geng, J. Cheng, F. Gao, Q. Huang, C. Yang, *Chin. J. Chem. Eng.*, **44**, 51 (2022). DOI: 10.1016/j.cjche.2021.03.045
- [7] I. Malgarinos, N. Nikolopoulos, M. Gavaises, *Fuel Process. Technol.*, **156**, 317 (2017). DOI: 10.1016/J.FUPROC.2016.09.014
- [8] N.M. Eijkelboom, A.P. van Boven, I. Siemons, P.F.C. Wilms, R.M. Boom, R. Kohlus, M.A.I. Schutyser, *J. Food Eng.*, **337**, 111222 (2023). DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111222
- [9] В.А. Архипов, С.А. Басалаев, А.И. Коноваленко, К.Г. Перфильева, *Письма в ЖТФ*, **46** (12), 40 (2020). DOI: 10.21883/pjtf.2020.12.49527.18300 [V.A. Arkhipov, S.A. Basalaev, A.I. Konovalenko, K.G. Perfil'eva, *Tech. Phys. Lett.*, **46** (6), 610 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020060176].
- [10] *Handbook of non-ferrous metal powders*, ed. by O.D. Neikov, S.S. Naboychenko, N.A. Yefimov (Elsevier, Oxford, 2019), p. 621. DOI: 10.1016/B978-0-08-100543-9.00014-2
- [11] S.K. Pawar, F. Henrikson, G. Finotello, J.T. Padding, N.G. Deen, A. Jongsma, F. Innings, J.A.M.H. Kuipers, *Powder Technol.*, **300**, 157 (2016). DOI: 10.1016/j.powtec.2016.06.005
- [12] A.V. Demidovich, S.S. Kralinova, P.P. Tkachenko, N.E. Shlegel, R.S. Volkov, *Energies*, **12**, 4256 (2019). DOI: 10.3390/en12224256