

УДК 532.529

О МЕХАНИЗМЕ ЛЕВИТАЦИИ КАПЕЛЬ ПРИ ОБТЕКАНИИ ТЕЛ ГАЗОКАПЕЛЬНЫМИ ПОТОКАМИ

© 2021 г. Член-корреспондент РАН А. Ю. Варакин^{1,2,*}, Н. В. Васильев^{1,2,**}, С. Н. Вавилов¹

Поступило 22.09.2021 г.

После доработки 22.09.2021 г.

Принято к публикации 20.10.2021 г.

С использованием высокоскоростной видеосъемки впервые обнаружен эффект появления капель с околонулевыми скоростями при обтекании тел газокapельными потоками. Образование левитирующих капель происходило вследствие слияния падающих и отраженных от модели капель. Высказано предположение, что основным механизмом появления капель с околонулевыми скоростями является обмен импульсом в результате столкновения капель, имеющих противоположные по направлению и близкие по величине значения скорости. Обнаружен эффект увеличения размера крупных левитирующих капель из-за слияния с ними падающих капель вследствие многократных соударений.

Ключевые слова: газокapельные потоки, обтекание тел, столкновения капель, левитация

DOI: 10.31857/S2686740021060158

Проблема взаимодействия газокapельных потоков с обтекаемыми телами возникла в связи с изучением движения различных летательных аппаратов в дождевой атмосфере [1], а также движения двухфазных теплоносителей в трактах энергетических установок. Присутствие капель в потоке может приводить к существенному (порой многократному) увеличению тепловых потоков, а также к эрозионному износу обтекаемой поверхности. Указанные эффекты вызываются совместным действием целого ряда причин, среди которых важное место занимают соударения капель с поверхностью, а также межкапельные столкновения.

При проведении детальных исследований отдельных единичных процессов (столкновение капли и стенки, столкновение падающих и отраженных капель и др.) авторами был выявлен эффект появления вблизи критической точки одиночных капель, левитирующих над поверхностью модели. Имеется большое количество работ, в которых изучались процессы левитации капель, вызываемых действием электростатического, электромагнитного [2–5] и акустического [6] полей, а также аэродинамических сил [7–12], возникаю-

щих, в частности, над локально нагретыми жидкостями и твердыми поверхностями. Хорошо известны эффекты левитации твердых частиц и различных предметов в концентрированных вихревых потоках [13–15], природными аналогами которых являются воздушные смерчи.

Целью настоящей работы является описание и анализ обнаруженного экспериментальным путем эффекта появления вблизи критической точки тела капель, имеющих околонулевые скорости.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1. В качестве модели выступал медный цилиндр 1 диаметром 20 мм и длиной 82 мм с передней кромкой в форме полусферы. Модель погружалась в нагреватель 2, посредством которого имелась возможность ее разогрева. Мощность нагрева регулировалась с помощью автотрансформатора (модель АОСН-8-220-82-УХЛ4) и не превышала 300 Вт.

Капли дистиллированной воды диаметрами от 300 до 800 мкм создавались с помощью специального генератора капель 3, расположенного на расстоянии 95 мм от критической точки модели.

Для удаления окислов меди и прочих загрязнений поверхности модели перед проведением каждого эксперимента медная полусфера шлифовалась до 6-го класса точности. Краевой угол смачивания

¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

*E-mail: varaksin_a@mail.ru

**E-mail: nikvikvas@mail.ru

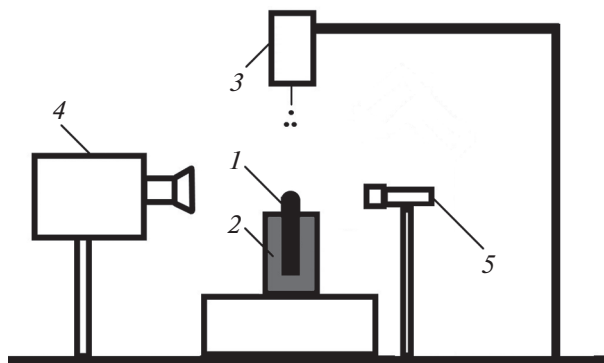


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – модель, 2 – нагреватель с теплоизоляцией, 3 – генератор капель, 4 – скоростная видеокамера, 5 – подсветка.

поверхности измерялся методом одиночной капли и был равен $\sim 60^\circ$.

Видеосъемка процесса взаимодействия капель с поверхностью нагретой медной полусферы осуществлялась с использованием высокоскоростной камеры 4 (модель Photron Fastcam SA4) с частотой кадров 5 кГц и экспозицией 20 мкс. С целью улучшения качества видеосъемки использовалась подсветка 5.

Покадровый анализ видеозаписей позволяет получать обширную информацию о следующих основных кинематических, геометрических и временных параметрах, определяющих процесс взаимодействия капель между собой и с поверхностью модели. К этим параметрам относятся: скорости и размеры падающих и отраженных капель, а также крупных “суммарных” капель, образующихся путем коалесценции падающих и отраженных; время взаимодействия сталкивающихся капель; время взаимодействия капель с поверхностью модели; период осцилляции поверхности капель и др.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Цель проведенных экспериментов – установление основных физических механизмов, сопровождающих процесс столкновения капель с поверхностью модели, а также между собой. Эксперименты показали, что процесс деформации капли при столкновении с поверхностью обтекаемого тела увеличивает время ее нахождения на поверхности, что приводит к росту сечения (ядра) столкновений при прочих равных условий. Растекание капли при взаимодействии с моделью увеличивает эффективный размер (до нескольких раз), что также способствует росту сечения столкновений.

В результате выполненных исследований был выявлен следующий эффект. При близком к центральному (малый прицельный параметр) столкновении между падающими и отраженными каплями, имеющими схожие размеры и скорости, происходит их слияние (коалесценция). В результате этого образуется “суммарная” капля с очень малой (близкой к нулю) скоростью. Указанное обстоятельство приводит к росту сечения столкновений, так как “суммарная” капля находится в течение длительного времени (практически левитирует) вблизи поверхности обтекаемого тела и является своеобразной мишенью как для падающих, так и для отраженных капель.

Наглядным подтверждением сказанному может служить рис. 2, на котором приведены выборочные кадры видеозаписи, иллюстрирующие процесс образования капель с околонулевыми скоростями.

Процесс формирования левитирующей капли начинается после столкновения отраженной от модели капли 1 с падающей каплей 2 (рис. 2а). В результате обмена импульсом более крупной капли 1 с более мелкой, но имеющей большую скорость, каплей 2 образуется “суммарная” капля (капля 1 + 2), имеющая низкую (околонулевою) скорость.

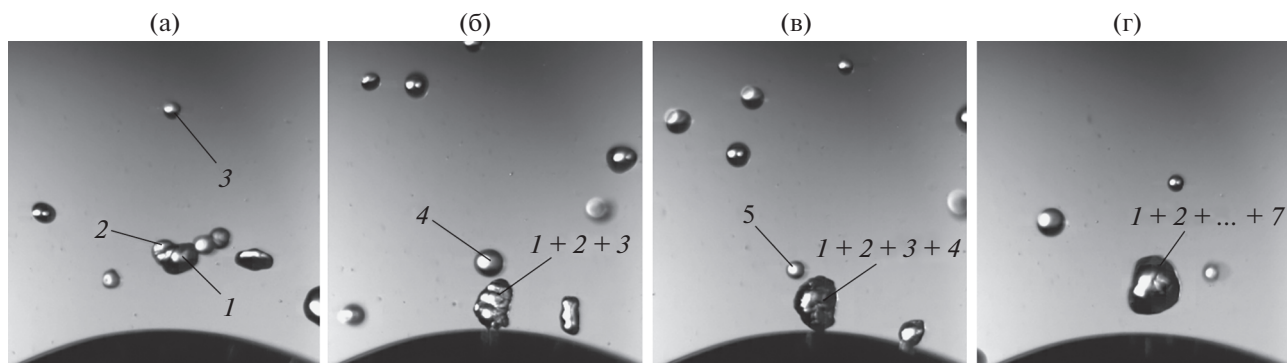


Рис. 2. Иллюстрация механизма появления левитирующих капель в окрестности критической точки тела (размер изображения – 9.1×9.4 мм); время от момента столкновения первой и второй капель: (а) 0.2 мс; (б) 9 мс; (в) 13.6 мс; (г) 50 мс. Цифрами обозначены номера капель.

Далее образовавшаяся “суммарная” капля претерпевает столкновения с каплями 3, 4 и 5 (рис. 2а–в). Отметим, что столкновения зачастую характеризуются большими значениями прицельного параметра, что оказывает существенное влияние на процесс взаимодействия. Известно, что при больших прицельных параметрах происходит слияние капель с последующим “растягивающим” или “возвратным” их разделением. В условиях близости поверхности модели ситуация меняется качественным образом. Разделения капель, как правило, не происходит. Например, капля 4 проходит через поверхность “суммарной” капли (капля 1 + 2 + 3), достигает поверхности модели, находясь внутри ее (рис. 2б). Затем происходит растекание нижней части вновь образовавшейся крупной капли (капля 1 + 2 + 3 + 4) и последующее ее собирание, сопровождающееся интенсивными осцилляциями ее поверхности. В результате такого взаимодействия происходит смена направления первоначально передаваемого импульса (вниз к поверхности модели) от падающей капли 4, на противоположное направление (вверх от поверхности модели), когда капля 4 поглощается крупной каплей.

Процесс обмена импульсом происходит в несколько стадий. Значительная часть кинетической энергии падающей капли тратится на преодоление поверхностного натяжения левитирующей капли. Затем происходит формирование струйного течения внутри левитирующей капли и его выход через нижнюю поверхность капли. Далее следует растекание струи по поверхности модели и ее последующее собирание. Вследствие этого возникает “поддерживающая” сила, препятствующая осаждению капли на поверхность модели.

Описанный выше механизм возникновения “поддерживающей” силы, направленной вверх (противоположно силе тяжести), способствует продолжительной левитации капель. В результате крупная левитирующая капля могла состоять из 7 (рис. 2г) и более (до 20–25) падающих капель.

Одними из основных безразмерных параметров, определяющих столкновения капель, являются числа Вебера We и Онезорге Oh , имеющие следующий вид

$$We = \frac{\rho V_r^2 d_{d0}}{\sigma}, \quad Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma d_{d0}}},$$

где ρ , σ , μ – плотность, поверхностное натяжение и динамическая вязкость материала капель соответственно; V_r – относительная скорость; d_{d0} – характерный диаметр капли для построения безразмерных параметров (обычно в качестве него выступает диаметр мелкой капли).

Для условий описываемых экспериментов указанные выше параметры изменялись в диапазоне $We = 12.5–25$ и $Oh = 0.0035–0.005$.

Описанный выше сценарий формирования вблизи тела крупных капель, левитирующих на протяжении продолжительного времени (до 0.1–0.3 с) около его поверхности, многократно наблюдался в экспериментах.

Таким образом, проведенные эксперименты позволили впервые наблюдать появление левитирующих капель в области критической точки тела, обтекаемого газокпельным потоком. Формирование указанных капель происходит в результате столкновения падающих и отраженных от тела капель. Вследствие сложного процесса обмена импульсом между каплями, сопровождающегося сильной деформацией поверхности капель, возникает сила, препятствующая осаждению левитирующих капель.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-19-00551).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вараксин А.Ю. Двухфазный пограничный слой газа с твердыми частицами // ТВТ. 2020. Т. 58. № 5. С. 789–808.
2. Ohji T., Yamaguchi S., Amei K., Kiyota K. Magnetic levitation of a ferrofluid in mid-air // AIP Advances. 2020. V. 10. № 1. Paper № 015037.
3. Fedorets A.A., Dombrovsky L.A., Gabyshev D.N., Bormashenko E., Nosonovsky M. Effect of external electric field on dynamics of levitating water droplets // Int. J. Thermal Sci. 2020. V. 153. Paper № 106375.
4. Fedorets A.A., Dombrovsky L.A., Bormashenko E., Nosonovsky M. On relative contribution of electrostatic and aerodynamic effects to dynamics of a levitating droplet cluster // Int. J. Heat Mass Transfer. 2019. V. 133. P. 712–717.
5. Dombrovsky L.A., Fedorets A.A., Levashov V.Y., Kryukov A.R., Bormashenko E., Nosonovsky M. Stable cluster of identical water droplets formed under the infrared irradiation: experimental study and theoretical modeling // Int. J. Heat Mass Transfer. 2020. V. 161. Paper № 120255.
6. Sasaki Y., Hasegawa K., Kaneko A., Abe Y. Heat and mass transfer characteristics of binary droplets in acoustic levitation // Phys. Fluids. 2020. V. 32. № 7. Paper № 072102.
7. Fedorets A.A., Dombrovsky L.A. Generation of levitating droplet clusters above the locally heated water surface: a thermal analysis of modified installation // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 104. P. 1268–1274.
8. Mogilevskiy E. Levitation of a nonboiling droplet over hot liquid bath // Phys. Fluids. 2020. V. 32. № 1. Paper № 012114.

9. *Ajaev V.S., Kabov O.A.* Levitation and self-organization of droplets // *Annual Rev. Fluid Mech.* 2019. V. 53. P. 261–282.
10. *Zaitsev D.V., Kirichenko D.P., Kabov O.A., Ajaev V.S.* Levitation conditions for condensing droplets over heated liquid surfaces // *Soft Matter.* 2021. V. 17. P. 4623–4631.
11. *Ajaev V.S., Zaitsev D.V., Kabov O.A.* Levitation of evaporating microscale droplets over solid surfaces // *Phys. Rev. Fluids.* 2021. V. 6. № 5. Paper № 053602.
12. *Sawaguchi E., Matsuda A., Hama K., Saito M., Tagawa Y.* Droplet levitation over a moving wall with a steady air film // *J. Fluid Mech.* 2019. V. 862. P. 261–282.
13. *Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Конейцев В.Н.* К вопросу управления поведением воздушных смерчей // *ТВТ.* 2009. Т. 47. № 6. С. 870–876.
14. *Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Конейцев В.Н., Таекин С.И.* Параметры неустойчивой стратификации воздуха, приводящей к генерации свободных вихрей // *ТВТ.* 2010. Т. 48. № 2. С. 269–273.
15. *Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N.* Effect of net structures on wall-free non-stationary air heat vortices // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 2013. V. 64. P. 817–828.

ON THE MECHANISM OF DROPLET LEVITATION IN GAS-DROPLET FLOWS PAST BODIES

Corresponding Member of the RAS **A. Yu. Varaksin^{a,b}, N. V. Vasil'ev^{a,b}, and S. N. Vavilov^a**

^a *Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation*

By using of high-speed video filming the effect of the appearance of droplets with near-zero velocities in gas-droplet flows past bodies was discovered for the first time. The formation of levitating droplets occurred as a result of the coalescence of falling and reflected from the model droplets. It has been suggested that the main mechanism for the appearance of drops with near-zero velocities is momentum exchange as a result of the collision of droplets with opposite directions and close in magnitude values of velocity. The effect of an increase in the size of large levitating drops due to the coalescence of falling droplets with them due to multiple collisions has been detected.

Keywords: gas-droplet flow, flow past bodies, droplet collision, levitation