



Фрагментация капли воды при ударе о диск¹

Рожков А.Н., Федюшкин А.И.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАНН

Работа посвящена исследованию деформации и фрагментации капель жидкости при их столкновении с масками и фильтрами, защищающими от зараженных капель воздуха. Кашель и чихание вызывают выброс капель слюны и бронхиальной слизи. Многие вирусы, в том числе COVID-19, живут только в жидкой среде, поэтому актуально исследование динамики и фрагментации капель. В данной работе экспериментально и численно локально столкновение капли с маской или фильтром моделируется ударом капли о небольшое препятствие. Исследования позволяют качественно проследить фрагментацию ротовой и бронхиальной жидкостей и их превращение в количество мельчайших капель, распространяющих инфекцию в воздухе. В реальности примерно такие же значения числа Вебера возникают, когда зараженные капли попадают на маски и фильтры.

Столкновение капли с диском

Фрагментация капли и образование мелких вторичных капель прослежено на примере столкновения капли воды с препятствием в виде диска [1, 2]. При столкновении капли с дискообразным препятствием формируется всплеск, образованный тонкой круглой жидкой ламеллой, ограниченной круглой краевой струей (Рис. 1, 2). Всплеск сначала расширяется (диаметр краевой струи d увеличивается), а затем схлопывается, как показано на Рис. 2. При увеличении скорости удара v_i краевая струя начинает распадаться на вторичные капли, которые являются потенциальными переносчиками инфекции. Образование капель (разбрызгивание) происходит, как при расширении всплеска, так и при его сжатии, и вторичные капли могут двигаться в

противоположных направлениях.

На Рис. 3 показаны экспериментальные траектории краевых струй $d(t)$ для различных высот падения капель h . Здесь же представлены зависимости максимального диаметра всплеска d_{max} от ударного числа Вебера $We_i = \rho v_i^2 d_i / \gamma$ (использованы стандартные обозначения). Данные экспериментов свидетельствуют, что переход к разрушению всплеска происходит в интервале чисел Вебера $We_i \in (137, 206)$.

Численное моделирование

Характер растекания капли определяется соотношением и взаимодействием сил инерции и поверхностного натяжения [1]. Задача характеризуется безразмерными числами Рейнольдса $Re_i = \rho v_i d_i / \mu$ и числом Вебера $We_i = \rho v_i^2 d_i / \gamma$, где ρ — плотность, v_i — скорость падения капли, d_i — диаметр капли, μ — вязкость, и γ — коэффициент поверхностного натяжения. Для капель воды задавались следующие свойства: $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ — плотность, $\mu = 1 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ и $\gamma = 0.072 \text{ Н/м}$. Математиче-

¹Работа выполнена в рамках государственного задания № 123021700044-0 и гранта РФФИ 23-19-00451

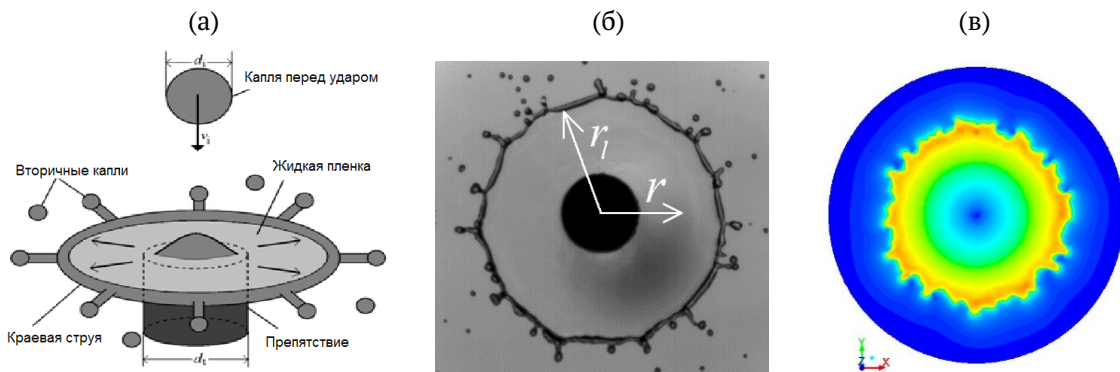


Рис. 1. (а) – схема движения капли, (б, в) – растекание капли воды ($v_i = 3.87$ м/сек), (б) – эксперимент, (в) – 3D моделирование (изолинии модуля скорости)

Время	$h = 0.18$ м ($v_i = 1.88$ м/с, $We_i = 137$)	$h = 0.27$ м $v_i = 2.30$ м/с, $We_i = 206$)	$h = 0.35$ м ($v_i = 2.62$ м/с, $We_i = 267$)	$h = 0.65$ м ($v_i = 3.57$ м/с, $We_i = 496$)
2 мс				
4 мс				
6 мс				

Рис. 2. Вид сверху на столкновение капли воды диаметром $d_i = 2.8$ мм с дискообразной мишенью диаметром $d_t = 4$ мм (черный круг) для различных высот падения капель h . Капли имеют скорость удара $v_i = 1.88, 2.30, 2.62$ и 3.57 м/с ($We_i = 137, 206, 267$ и 496)

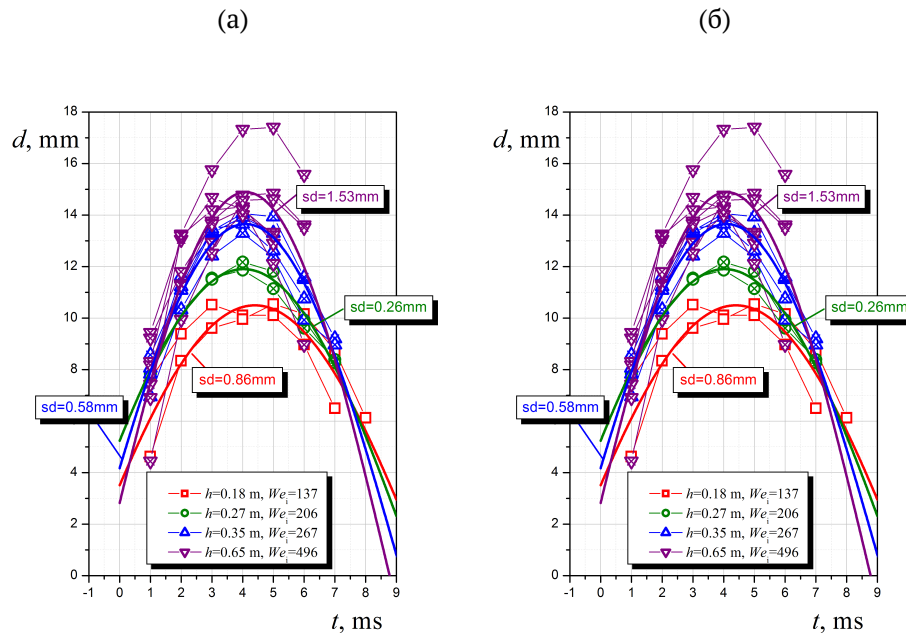


Рис. 3. (а) Диаметр всплеска d как функция времени t . Всплеск образуется в результате падения капли диаметром 2.8 мм с разной высоты h на дискообразную мишень. sd – стандартное отклонение экспериментальных точек от соответствующих аппроксимирующих кривых (утолщенные линии). (б) Отношение максимального диаметра всплеска d_{\max} и начального диаметра капли $d_i = 2.8$ мм, как функция числа Вебера We_i [1, 2]. На Рис. (а) и (б) крестиками отмечены точки, соответствующие разрушению всплеска с образованием вторичных капель

ская модель основана на решении 2D и 3D уравнений Навье–Стокса методом контрольных объемов для двухфазных жидкостных систем «воздух-жидкость» с использованием VOF метода. Подробнее математическая модель описана в работах авторов [3]. На рис. 4 представлены результаты 3D моделирования растекания капли воды. Для реальных ротовых и бронхиальных капель на водной основе типичного диаметра $d_i = 100$ мкм и скорости удара порядка $v_i = 10$ м/с число Вебера удара порядка $We_i = 139$. Следовательно, оценки свидетельствуют $We_i \gg 1$ и $Re_i \gg 1$. Поэтому столкновение контролируется исключительно инерцией и капиллярностью, в то время как влияние всех других факторов несущественно [1]. Численные результаты предсказывают разбрызгивание в диапазоне чисел Вебера $We_i \in (137, 206)$ в соответствии с результатами экспериментов и оценками натуральных условий [4].

Заключение

Результаты исследований показали, что распространение инфекции может происходить из-за распада капель при ударе о твердые препятствия в реальных природных условиях (in-situ). Переход

к разбрызгиванию капли жидкости на вторичные капли происходит при числах Вебера $We_i > We_i^*$, где $We_i^* \in (137, 206)$. Капли биологических жидкостей сталкиваются с материалом масок и фильтров примерно с одинаковыми числами Вебера $We_i \approx 100$. Таким образом, исследуемые процессы фрагментации капель в лабораторном эксперименте, и происходящие в реальности, имеют одни и те же механизмы. Данные исследования позволяют проследить фрагментацию ротовой и бронхиальной жидкостей и их превращение в количество мельчайших капель, распространяющих инфекцию в воздухе.

Список литературы

- [1] Rozhkov A., Prunet-Foch B., Vignes-Adler M. Dynamics of a liquid lamella resulting from the impact of a water drop on a small target // Proc. R. Soc. Lond. 2004. V. A 460. P. 2681–2704.
- [2] Федюшкин А.И., Рожков А.Н. Критерий растекания/разбрызгивания капли при ударе о твердую мишень // 7-ая Международная научная конференция-школа молодых ученых "Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах Москва, 20 – 22 октября 2021 года, ИПМех РАН Москва, С. 230–233.
- [3] Федюшкин А.И., Рожков А.Н. Математическое моделирование и численные методы. 2020. Т. 26. № 2. С. 46–58.
- [4] Rozhkov A., Prunet-Foch B., Fedushkin A., Vignes-Adler M. Fragmentation of water drops in collision with a small obstacle // Atomization and Sprays. 2023. V. 33. No 10. P. 1–15.