

ГИДРОДИНАМИКА КАПЛИ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ С ПРЕПЯТСТВИЕМ

А.Н. Рожков, А.И. Федюшкин

Институт проблем механики им. А.Ю. Иилинского РАН

НИЦ «Курчатовский институт»

В данной работе приводятся результаты численного моделирования об ударе о твердую поверхность и растекании капель на основе решения уравнений Навье-Стокса для двухфазной системы «воздух-жидкость» с разными свойствами и проведено сравнение с экспериментальными данными.

1. Постановка задачи. Рассматривается капля диаметром d_i , падающая на твердое препятствие, имеющее плоскую поверхность «мишени» диаметром d_t . Можно исключить влияние твердой поверхности на динамику растекания капли, выбирая мишени с диаметром гораздо меньшим, чем d_m - максимальный диаметр растекания капли (ламели), но больше, чем диаметр капли $d_i < d_t < d_m$. Схема падения и растекания капли показана на рис.1. Капля в момент касания с препятствием имеет диаметр d_i и скорость v_i .

Характер растекания капли определяется соотношением и взаимодействием сил инерции, вязкости и поверхностного натяжения, а также углом смачивания поверхности. Задача характеризуется безразмерными числами Рейнольдса $Re = \rho v_i d_i / \mu$ и числом Вебера $We = \rho v_i^2 d_i / \sigma$, где ρ - плотность, v_i - скорость падения капли, d_i - диаметр капли, μ - вязкость, и σ - коэффициент поверхностного натяжения. Для капель воды свойства задавались следующие: $\rho = 998.2 \text{ кг/м}^3$, - плотность, $\mu = 10^{-3} \text{ кг/м сек}$, и $\sigma = 0.0726 \text{ Н/м}^2$.

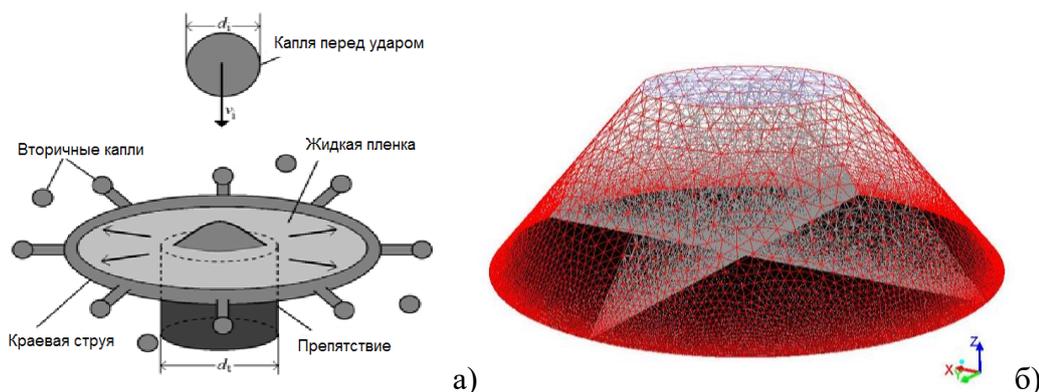


Рис. 1. а) - Схема движения капли, б) - схема расчетной области и сетки 3D модели.

На рис. 1б изображена внешняя граница расчетной области 3D модели и дополнительно представлены две виртуальные плоскости ($x=0$ и $y=0$), которые использовались для отображения сетки и результатов расчета в данных сечениях.

2. Результаты. Математическая модель основана на решении 2D и 3D уравнений Навье-Стокса методом контрольных объемов для двухфазных жидкостных систем «воздух - жидкость» с учетом и без учета силы тяжести.

На фотографиях рис. 2 (слева) представлены экспериментальные данные растекания капли воды ($v_i=3.87$ м/сек, $d_i=2,67$ мм, $d_i=4$ мм), показывающие формирование ламели, краевой струи и вторичных капель в момент времени $t=10^{-3}$ сек. На рис.2 (справа) изображены результаты 3D моделирования динамики капли воды ($v_i=3.87$ м/сек, $d_i=1$ мм), падающей на твердую гидрофобную поверхность и растекаясь по ней без трения. На рис. 2а показан профиль капли сбоку (изолинии доли фракции воды) в плоскости $y=0$ в момент времени $t=5 \cdot 10^{-4}$ сек, характерно, что под каплей в окрестности начала координат существует небольшая область с концентрацией воздуха. На рис. 2б изображены изолинии модуля скорости, из которых виден контур растекающейся капли с краевой струей в момент $t=7 \cdot 10^{-4}$ сек. Следует отметить, что безразмерные времена $\tau=t/(d_i/v_i)$ в эксперименте и в расчетах на рис.2 были близки и приблизительно равны 2. Сравнение данных эксперимента и результатов математического моделирования по динамике капли показало хорошее их согласие.

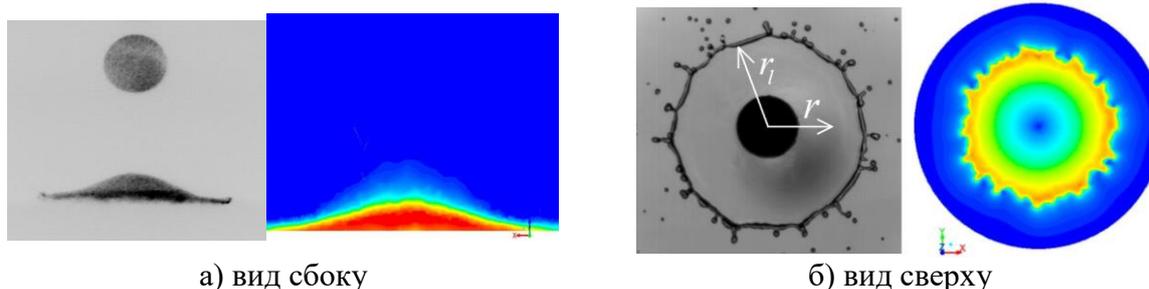


Рис. 2. Вид сбоку (а) и сверху (б) растекающейся капли (левые фото – эксперимент, правые изолинии доли фракции воды - 3D моделирование, ($v_i=3.87$ м/сек, $d_i=1$ мм)

2.1 Удар капли о твердую поверхность. Результаты экспериментов и математического моделирования показали, что начальная стадия взаимодействия падающей капли с твердой поверхностью краткосрочна и нетривиальна. На рис. 3 изображена динамика падающей капли воды в окрестности соприкосновения капли с мишенью показано формирование начальной струи и ламеллы с краевой струей при ударе капли о твердую поверхность в начальные моменты взаимодействия с твердой поверхностью. Во-первых, при падении капли с большой скоростью и столкновении ее с твердой поверхностью возможен захват воздуха (в виде пузырька или мини тора) между каплей и поверхностью (рис. 2а). Во-вторых, при соприкосновении с поверхностью образуется очень тонкая и, как следствие, очень быстрая начальная струя

(рис. 3 а,б), а затем формируется ламель с краевой струей (рис. 3в), которая схематично изображена на рис.1.

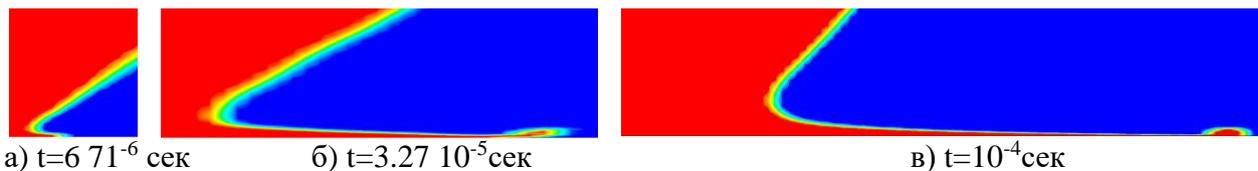


Рис. 3 Формирование начальной струи и ламеллы с краевой струей при ударе капли о твердую поверхность.

2.1 Растекание капли. На рис. 4. представлены распределения фракций воды при падении и растекании капли на твердой поверхности небольшого диаметра ($d_f=4\text{мм}$, $d_i=3.89\text{ мм}$, $v_i=3.83\text{ м/сек}$, $We=792$, $Re=1.5 \cdot 10^3$) для разных моментов времени от $t=3.6 \cdot 10^{-4}$ до $t=3.51 \cdot 10^{-3}$ сек.

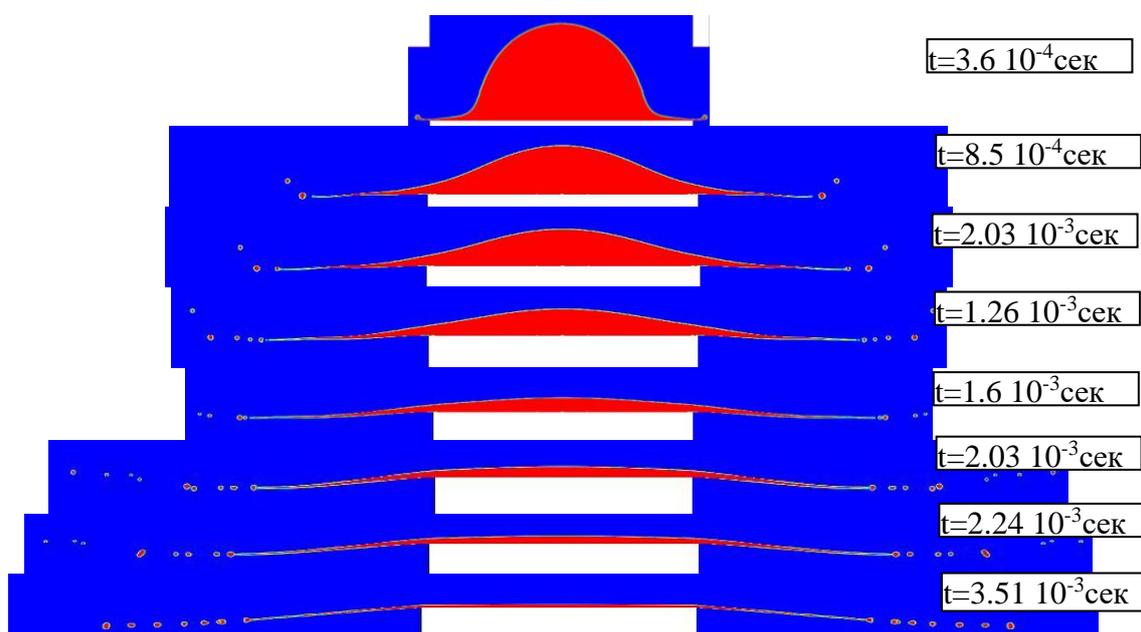


Рис. 4. Распределение фракции воды при падении и растекании капли на твердой поверхности ($d_f=3.89\text{ мм}$, $v_i=3.83\text{ м/сек}$, $We=792$, $Re=1.5 \cdot 10^3$) для разных моментов времени (от $t=3.6 \cdot 10^{-4}$ до $t=3.51 \cdot 10^{-3}$ сек)

Результаты математического моделирования показали, что в течение времени от ламели могут отрываться мелкие капли (рис. 4). Это зависит от свойств жидкости капли (а также от свойств газа в котором формируется ламель) и может происходить из-за неустойчивости поверхности раздела жидкость-воздух при больших значениях чисел Рейнольдса и Вебера. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными показало хорошее их согласие. Результаты подтвердили, что структура течения в маловязкой капле при столкновении с препятствием является универсальной и не зависит от параметров удара и свойств жидкости, как это было найдено ранее авторами.