

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СТОЛКНОВЕНИЯ КАПЕЛЬ С  
НЕОДНОРОДНЫМ СОСТАВОМ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ**

**Р.М. Федоренко, Д.В. Антонов**

Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор П.А. Стрижак

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

**Введение.** Газопарокапельные потоки различного состава и дисперсности являются распространенной технологической средой для широкой группы производственных процессов [3,5,6]. Эффективность таких технологий в значительной степени зависит от скорости испарения жидкости, которая в свою очередь напрямую зависит от площади контакта с греющим теплоносителем. Поэтому минимальные размеры капель жидкости соответствуют наибольшей эффективности нагрева и испарения капель. Мелкодисперсные потоки, согласно результатам экспериментов [4], могут быть легко унесены из зоны теплообмена вследствие возникающих эффектов торможения и разворота. Одним из путей повышения эффективности испарения жидкостей является вторичное измельчение капель непосредственно в зоне теплообмена за счет столкновений между собой.

Цель настоящей работы – разработка математической модели взаимодействия капель жидкости с неоднородным составом в газовой среде.

**Описание модели.** Для описания столкновения капель жидкости с использованием основных физических свойств (плотность, вязкость, поверхностное натяжение) применяют безразмерные критерии: число Вебера ( $We$ ), отношение размеров ( $\Delta$ ):

$$We = \frac{\rho U_d^2 D_0}{\sigma}; \quad \Delta = \frac{D_1}{D_2},$$

где  $\rho$  – плотность жидкости,  $кг/м^3$ ;  $U_d$  – относительная скорость движения капли,  $м/с$ ;  $D_0$  – начальный размер капли,  $м$ ;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $Н/м$ ;  $D_1, D_2$  – диаметр первой и второй капли,  $м$ .

Для моделирования взаимодействия капель в газовой среде применялся метод VOF (Volume of Fluid) [1]. В данном подходе жидкая и газовая фазы рассматриваются в качестве единой многокомпонентной среды, при этом распределение фаз в расчетной области определяется с помощью специальной функции маркера  $F(x,y,z,t)$ . Объемная доля фазы в расчетной ячейке принимается равной  $F(x,y,z,t) = 0$ , в случае если ячейка пустая,  $F(x,y,z,t) = 1$ , в случае если ячейка полностью заполнена фазой, и  $0 < F(x,y,z,t) < 1$ , в случае, если через ячейку проходит граница раздела фаз. В каждой ячейке сумма объемных долей всех фаз равная 1.

Отслеживание перемещения свободной границы жидкости в пространстве осуществляется путем решения уравнения переноса объемной доли фазы в ячейке.

Уравнение неразрывности для модели VOF имеет следующий вид:

$$\frac{\partial F_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} F_1) = 0.$$

Уравнение моментов для смеси выражается как сумма отдельных уравнений моментов всех фаз:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \rho_{12} \vec{v} \right) + \nabla \cdot \left( \rho_{12} \vec{v} \vec{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ \mu_{12} \left( \nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T \right) \right] + \rho_{12} \vec{g} + f_{V12}.$$

где  $\rho_{12} = \rho_1 \cdot F_1 + \rho_2 \cdot F_2$ ;  $\mu_{12} = \mu_1 \cdot F_1 + \mu_2 \cdot F_2$ ;  $f_{V12} = \sigma_{12} \frac{F_1 \rho_1 \kappa_1 \nabla F_1 + F_2 \rho_2 \kappa_2 \nabla F_2}{0.5(\rho_1 + \rho_2)}$ ;  $\kappa_1 = -\kappa_2 = -\nabla \cdot \left( \frac{\nabla F_1}{|\nabla F_1|} \right)$ .

**Обозначения:**  $F$  – объемная доля;  $f_v$  – сила поверхностного натяжения;  $g$  – ускорение свободного падения;  $p$  – давление;  $t$  – время;  $\kappa$  – кривизна поверхности;  $\mu$  – динамическая вязкость,  $Па \cdot с$ ;  $v$  – скорость,  $м/с$ ; 1 – вода; 2 – воздух; 12 – система вода–воздух.

При расчетах использовалась динамическая адаптация сетки, позволяющая уточнять сетку вокруг границы раздела фаз и огрублять сетку в местах, где граница раздела фаз не проходит [2].

**Результаты и обсуждения.** На рисунке 1 представлено сравнение кадров коагуляции (слияния двух капель жидкости в одну более крупную) капель воды, полученных по результатам экспериментов (а), и концентрационных полей, полученных по результатам расчетов (б). Столкновения проводились в области, заполненной водяным паром, концентрация паров составляла 100 %, жидкость находилась при температуре 80 °С. Коагуляция капель происходит при сонаправленном движении капель (одна капля догоняет другую). На рисунке 1 показано, что режимы взаимодействия капель совпадают, контуры капель в процессе коагуляции схожи, хорошо прослеживается наблюдение всех основных стадий процесса. На кадрах также видно образование жидкого мостика между двумя каплями в процессе коагуляции. Однако, конечная форма капель и времена взаимодействия в эксперименте и в модели различаются.

На рисунке 3 показано сравнение кадров дробления каплей раствора глицерина с объемной концентрацией 50 об.%, полученных в ходе проведения экспериментов (а), и концентрационных полей, полученных по результатам моделирования (б). Столкновения каплей осуществлялись при нормальных условиях в среде, заполненной воздухом, при температуре жидкости 20 °С. Столкновение каплей осуществлялось при встречном движении каплей. На рисунке 3 показано, что кадры основных стадий процесса дроблений каплей схожи, однако количество вторичных каплей, их размеры, а также времена взаимодействия каплей в модели и эксперименте отличаются.

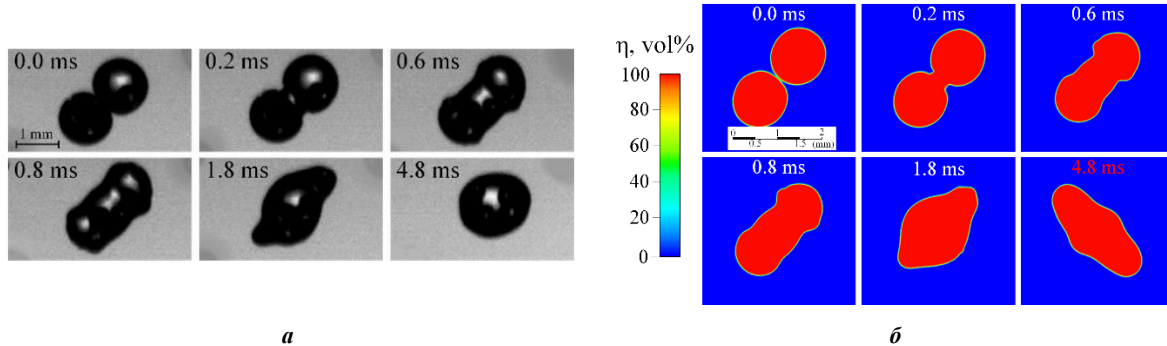


Рис. 1. Кадры коагуляции каплей воды при температуре жидкости 80 °С ( $D_1=1,202$  мм,  $D_2=1,192$  мм,  $U_1=1,67$  м/с,  $U_2=2,05$  м/с): а – эксперимент; б – модель

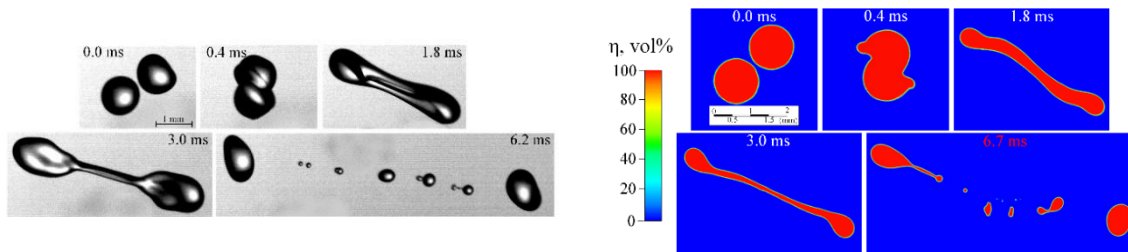


Рис. 2. Кадры дробления каплей раствора глицерина при температуре жидкости 20 °С ( $D_1=1,148$  мм,  $D_2=1,138$  мм,  $U_1=1,68$  м/с,  $U_2=1,25$  м/с): а – эксперимент; б – модель

Различия результатов моделирования от эксперимента обусловлено допущениями, принимаемыми в модели, а также погрешностями при определении ключевых параметров в эксперименте: в модели не учитывается движение каплей по третьей координате, что может приводить к дополнительному вращательному движению капли в эксперименте; использование справочных свойств жидкостей при расчетах; при расчетах принималось, что в начальный момент капли имеют сферическую форму, хотя в экспериментах регистрировались деформации поверхности капли в процессе движения; погрешности в определении положения центров каплей, скоростей и углов атаки могут оказывать влияние на центричность удара и, следовательно, последствий взаимодействия.

**Заключение.** Проведено численное исследование процессов соударения каплей жидкости в газовой среде. Результаты сравнения кадров, полученных при проведении экспериментов, и концентрационных полей, полученных по результатам численного моделирования, позволило установить адекватное воспроизведение основных стадий процесса столкновения каплей. Отличия модели от эксперимента обусловлено рядом допущений, принимаемых в модели, а также погрешностями при определении ключевых параметров в эксперименте.

*Исследование выполнено за счет гранта РФФИ в рамках проекта 18-71-10002.*

#### Литература

1. Hirt C.W., Nichols B.D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // Journal of Computational Physics – 1981. – Vol. 39. – p. 201–225.
2. Hu C., Xia S., Li C., Wu G. Three-dimensional numerical investigation and modeling of binary alumina droplet collisions // International Journal of Heat and Mass Transfer – 2017. – Vol. 113. – p. 569–588
3. Kunkel S., Teumer T., Dornhofer P., Schlachter K., Weldeslasie Y., Kuhr M., Radle M., Repke J.U. Determination of heat transfer coefficients in direct contact latent heat storage systems // Applied Thermal Engineering, 2018. – Vol. 145. – p. 71–79.
4. Kuznetsov G.V., Piskunov M.V., Strizhak P.A. How to improve efficiency of using water when extinguishing fires through the explosive breakup of drops in a flame: Laboratory and field tests // International Journal of Thermal Sciences, 2017. – Vol. 121. – p. 398–409.
5. Romero R.J., Rodríguez-Martínez A. Optimal water purification using low grade waste heat in an absorption heat transformer // Desalination, 2008. – Vol. 220. – p. 506–513.
6. Zhang T.W., Liu H., Han Z.Y., Du Z.M., Wang Y. Active substances study in fire extinguishing by water mist with potassium salt additives based on thermoanalysis and thermodynamics // Applied Thermal Engineering, 2017. – Vol. 122. – p. 429–438.