

УДК 532.5: 536.24

Тыринов А.И., Авраменко А.А.,  
Басок Б.И., Тесля А.И

Институт технической теплофизики НАН Украины

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПАДА ВОДЯНОЙ СТРУИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ КОЛЕБАНИЙ СКОРОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ

Виконано числові дослідження змушеного розпаду водяного струменя під впливом гармонійних коливань швидкості витікання. Зроблено оцінку адекватності використовуваної моделі. Визначено області режимів розпаду струменя під впливом синусоїдальних коливань.

Выполнены численные исследования вынужденного распада водяной струи под воздействием гармонических колебаний скорости истечения. Показана адекватность используемой модели. Определены области режимов распада струи под воздействием синусоидальных колебаний.

Numerical investigations of the water jet break-up under the influence of harmonic fluctuations of inlet velocity are carried out. The adequacy of model is shown. Areas of jet break-up regimes under the influence of sine wave fluctuations are determined.

$a$  – объемная фракция жидкости;

$a_v$  – амплитуда;

$f$  – частота;

$k$  – кривизна поверхностной нормали;

$r$  – радиальная координата;

$p$  – давление;

$t$  – время;

$x$  – осевая координата;

$V_0$  – постоянная составляющая скорости;

$v_r$  – радиальная составляющая скорости;

$v_x$  – осевая составляющая скорости;

$\sigma$  – поверхностное натяжение;

$\rho$  – плотность;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости.

### Введение

Процессы гранулирования имеют широкое распространение во многих областях техники. Однако реальная эффективность их зависит от монодисперсности получаемых частиц. Значительное повышение эффективности рассматриваемых процессов дает применение вибрационного диспергирования жидкостей, основанное на возбуждении вынужденного распада струй с помощью модуляции скорости истечения жидкости и обеспечивающее получение потоков капель с составом, близким к монодисперсному. Численное моделирование процессов вынужденного распада струй позволит оптимизировать процессы диспергирования.

### Физическая модель

На рис. 1 показана схема исследуемой области. Через сопло с диаметром  $d_0$  вытекает струя воды

под действием силы тяжести в неограниченное пространство, заполненное воздухом. На входную скорость струи накладываются осцилляции с определенными частотами и амплитудами.

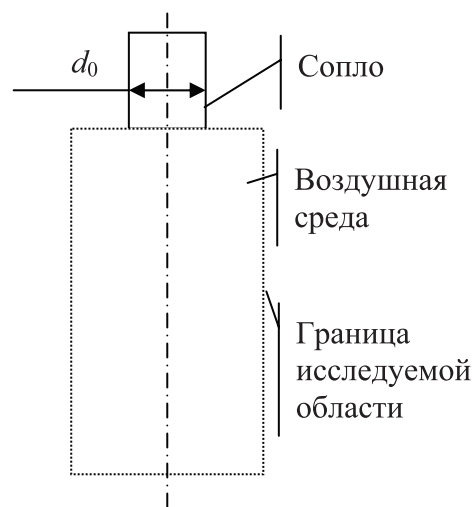


Рис. 1. Схема исследуемой области.

**Математическая модель**

Численные расчеты проводились на основе двухмерной осесимметричной модели. Уравнения переноса импульсов в осевом ( $x$ ) и радиальном ( $r$ ) направлениях имеют вид [1]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = \\ & = \rho g - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \frac{\partial v_x}{\partial x} \right] + \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = \\ & - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] + \\ & + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} + F_r. \end{aligned} \quad (2)$$

Эта система замыкалась уравнением неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho v_r}{\partial r} + \frac{\rho v_r}{r} = 0. \quad (3)$$

Плотность в уравнениях (1), (2) и (3) вычисляется по формуле

$$\rho = a_2 \rho_2 + (1 - a_2) \rho_1, \quad (4)$$

где  $a_2$  – объемная фракция среды (в данном случае воды) в вычислительной ячейке,  $\rho_2$  – ее плотность,  $\rho_1$  – плотность воздуха.

Используемая модель основывается на допущении, что исследуемые фазы (в данном случае вода и воздух) взаимно не проникают. Для каждой среды в модели введена переменная, представляющая собой объемную фракцию среды в вычислительной ячейке. В каждой ячейке сумма объемных фракций всех фаз составляет единицу. Таким образом, значения переменных в любой

ячейке определяют текущее количество данной фазы в зависимости от объемных значений фракции. Возможны следующие три состояния:

- ◆  $a_2 = 0$ : фаза в ячейке отсутствует,
- ◆  $a_2 = 1$ : фаза полностью заполняет ячейку,
- ◆  $0 < a_2 < 1$ : фаза заполняет ячейку частично.

Поверхность раздела между фазами определяется в соответствии с решением уравнения неразрывности для объемной фракции каждой фазы. Для  $q$ -й фазы это выражение имеет следующий вид:

$$\frac{\partial a_q}{\partial t} + \bar{v} \nabla a_q = 0.$$

$F_x$  и  $F_r$  в уравнениях (1) и (2) являются соответственно осевой и радиальной составляющими силы, учитывающей поверхностное натяжение [2]

$$F = \sigma \frac{\rho k_2 \nabla a_2}{\frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2)},$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение (в данном случае воды), кривизна  $k$  поверхности определяется следующим образом:

$$k = \nabla \hat{n}, \quad \hat{n} = \frac{n}{|n|}, \quad n = \nabla a_q.$$

**Геометрия расчетной области и граничные условия**

Расчетная область представляет собой прямоугольник с физическими размерами расчетной области 3мм x 70мм (рис. 2). Расчетная сетка является равномерной с размером ячейки 0,05мм x 0,05мм.

Для границ расчетной области, отмеченных цифрами на рис. 2, использованы следующие граничные условия:

Граница 1 – заданы скорость и объемная фракция жидкости. Средняя скорость жидкости  $V_0$  модулируется синусоидальными колебаниями и определяется выражением

$$v_x = V_0 [1 + a_v \sin(2\pi f t)].$$

Объемная фракция воды задана равной 1.

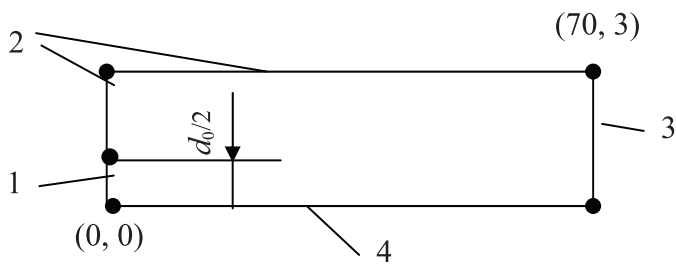


Рис. 2. Геометрия и типы грани, расчетной области.

Граница 2 – задано атмосферное давление. Объемная фракция воды задана равной 0.

Граница 3 – задано атмосферное давление.

Граница 4 – ось симметрии.

Моделирование проводилось для диаметров сопла 0,85 и 1,25 мм и средних скоростей истечения  $V_0$ , равных 0,6; 0,7; 1; 2 и 3 м/с. Значение амплитуды модулирующих колебаний  $a_y = 0,01$ .

### Результаты моделирования

Результаты моделирования показали, что струя жидкости под воздействием возмущающих колебаний распадалась или не распадалась на капли в зависимости от задаваемых параметров осцилляций скорости – амплитуды и частоты. Монодисперсность капель также зависит от этих параметров.

При постоянном значении скорости модель не может адекватно выявлять распад. Для правильного отражения физической картины необходимо вводить минимальные осцилляции [3]. Минимальная амплитуда, необходимая для моделирования распада, зависит от задаваемых скорости и частоты колебаний. Для рассмотренных параметров минимальное значение амплитуды составляет  $10^{-3}$  постоянной составляющей скорости.

На рис. 3 показаны результаты численного моделирования (а) и экспериментальных исследований (б), проведенных в ИТТФ НАНУ на экспериментальной установке. Эти результаты получены для диаметра струи, равного 1,25мм, частоты модулирующих колебаний 250 Гц и постоянной составляющей скорости 0,7м/с. Видно, что результаты численного моделирования хорошо коррелируют с эксперименталь-

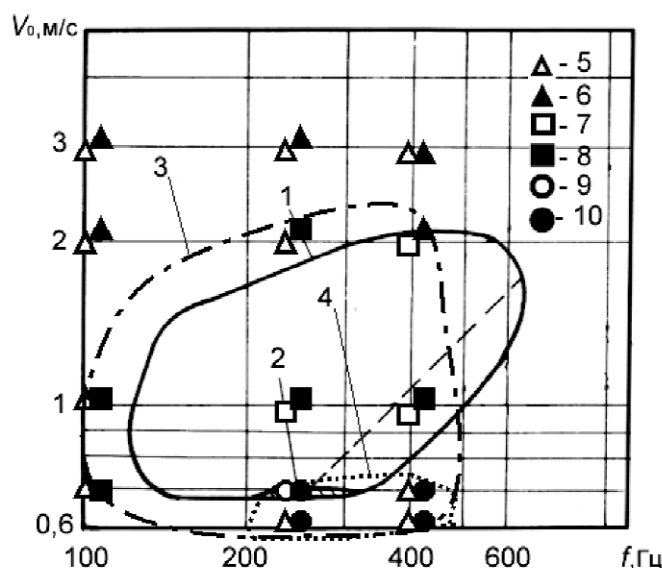


Рис. 3. Изображения поверхности струи при устойчивом распаде. а – полученное при моделировании; б – фотография эксперимента.

ными данными. Для вышеуказанных условий диаметры капель равны 2,45мм для эксперимента и 2,41мм для результатов моделирования, что составляет погрешность менее 2%. Это свидетельствует об адекватности предложенной модели.

Как результаты численного эксперимента, так и опытные данные свидетельствуют о том, что в ряде случаев при распаде струи могут образовываться капли-спутники.

В зависимости от варьирования параметров возникают различные режимы распада струи: распад отсутствует, распад с каплями-спутниками и монодисперсный распад (без спутников). Для технологических процессов гранулирования очень важным является получение монодисперсного состава образующихся капель. Полученные результаты моделирования позволили построить диаграмму в фазовой плоскости  $V_0 - f$ , которая определяет области для различных режимов распада струи. Диаграмма представлена на рис. 4. Тут же представлены и экспериментальные кривые [4]. Как можно увидеть, результаты численного моделирования распада струи диаметром 0,85мм хорошо согла-



**Рис. 4.** Диаграмма областей режимов распада струй под действием гармонических колебаний с нанесенными на нее результатами моделирования. 1 – экспериментальная область распада струи со спутниками диаметром 0,85 мм; 2 – экспериментальная область распада струи без спутников диаметром 0,85 мм; 3 – расчетная область распада струи со спутниками диаметром 1,25 мм; 4 – расчетная область распада струи без спутников диаметром 1,25 мм; 5 – диаметр 0,85 мм, нет распада; 6 – диаметр 1,25 мм, нет распада; 7 – диаметр 0,85 мм, распад со спутниками; 8 – диаметр 1,25 мм, распад со спутниками; 9 – диаметр 0,85 мм, распад монодисперсный; 10 – диаметр 1,25 мм, распад монодисперсный.

суются с экспериментальными данными для струи того же диаметра.

### Выводы

Рассмотренная математическая модель вынужденного распада струи под действием гармонических колебаний адекватно описывает физические процессы распада. Эта модель учитывает дополнительные факторы, описывающие влияние поверхностных сил. Ее использование позволяет определять параметры вынуждающих колебаний, необходимых для реализации монодисперсного распада.

### ЛИТЕРАТУРА

1. G.K. Batchelor. An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge Univ. Press, Cambridge, England, 1967.
2. J.U. Brackbill, D.B. Kothe, and C. Zemach. A Continuum Method for Modeling Surface Tension // J. Comput. Phys., 100:335-354, 1992.
3. Флетчер К., Численные методы на основе метода Галеркина. – М.: Мир, 1988. – 352 с.
4. Park R.W., Crosby E.J. A device for producing controlled collisions between pairs of drops. – Chem. Eng. Sci., 1965, Vol. 20, p.39 – 45.

Получено 04.12.2006 г.