

УДК 533.6

ИССЛЕДОВАНИЕ СПУТНОЙ СТРУИ ПРИ НАЛИЧИИ ПРОДОЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Д. Солтани, М. Шафай

Тегеранский университет, Тегеран, Иран
E-mails: delara.soltani@gmail.com, mshafae@ut.ac.ir

Выполнено численное моделирование поведения струи жидкости при наличии вынужденных возмущений и низкоскоростного соосного потока газа. Для исследования взаимодействия жидкости и газа используется метод жидких объемов. При изучении влияния вынужденных возмущений на поведение струи на входе в расчетную область задавалась синусоидальная скорость с конечными частотой и амплитудой. На струю жидкости накладывался кольцевой поток газа, скорость которого меньше скорости струи, и исследовалось его влияние на характер разрушения струи жидкости. Скорость кольцевого потока газа на входе модулировалась синусоидальной скоростью, исследовалось влияние этого потока на характер разрушения струи. Изучено влияние отношения скорости потока газа к скорости струи жидкости на характер разрушения этой струи. Установлено, что низкоскоростной поток газа оказывает существенное влияние на поведение струи, возрастающее с увеличением амплитуды возмущений.

Ключевые слова: струя жидкости, соосное течение газа, вынужденные возмущения, начальная стадия разрушения, метод жидких объемов.

DOI: 10.15372/PMTF20210108

Введение. Изучение процесса распыления струи представляет большой интерес, поскольку это явление используется во многих технологических процессах: при покрытии поверхностей путем распыления, при работе автомобильных двигателей, в струйных принтерах и т. п. Процесс распыления очень сложен, деформирование поверхности раздела жидкости и газа и последующее разрушение струи зависят от многих параметров: плотностей жидкости и газа, коэффициента поверхностного натяжения, динамической вязкости жидкости, характеристик окружающего газа, скорости струи и др.

Впервые исследование разрушения струи жидкости выполнено в работах [1, 2], математическая модель разрушения низкоскоростной струи невязкой жидкости вследствие капиллярной неустойчивости предложена Рэлеем в [3]. Вязкость жидкости и аэродинамические эффекты были учтены в работе [4]. В [5] экспериментально обнаружено образование капель сателлитов при разрушении капиллярной струи. При этом модель разрушения струи отличалась от предложенной Рэлеем модели, в соответствии с которой разрушение происходит с образованием однородных капель. Нелинейные теории, объясняющие капиллярный характер разрушения струи, использовались в работах [6–8]. Изучено влияние различных факторов на начальную стадию разрушения струи. В частности, влияние механических колебаний на характер разрушения струи экспериментально исследовано

в работе [9]. В [10] экспериментально и теоретически изучено поведение струи при модулировании ее скорости возмущениями высокой частоты. В [11] с использованием одномерных законов сохранения массы и количества движения построена теория, объясняющая влияние модуляции на форму струи жидкости. С помощью метода граничных элементов в работе [12] численно исследовано влияние акустических возмущений на процесс распыления струи жидкости и установлено, что под действием продольных возмущений на поверхности струи жидкости появляются утолщения, расположенные периодически (эффект Клисторна).

В работах [13–15] экспериментально исследовано поведение струи жидкого этанола, скорость которой модулировалась пьезоэлектрическими возмущениями различной частоты. Выполнена классификация форм разрушения струи: разрушение с образованием поверхностных волн, разрушение с появлением колоколо- и дискообразных выступов, направленных вверх и вниз по течению, разрушение с образованием множества цепочек из высоковоспроизводимых капель, разрушение типа стохастического распыления. Численное исследование модулируемой струи жидкости с использованием схемы захвата сжатого интерфейса на произвольных сетках (compressive interface capturing scheme for arbitrary meshes (CICSAM)) и метода жидких объемов выполнено в работе [16], в которой изучались осесимметричные ламинарные струи воды и этанола при различных значениях числа Струхала, скорости вылета струи и амплитуды возмущений. В работе [17] выполнено численное моделирование поведения высоко- и низкоскоростных струй жидкости при наложении на них продольных акустических возмущений. Показано, что вынужденное возмущение влияет на диаметр и длину зоны разрушения. В работе [18] методом жидких объемов с использованием метода наименьших квадратов проведено моделирование разрушения на начальной стадии пульсирующей струи жидкости в поперечном сверхзвуковом потоке и установлено, что в случае пульсирующей скорости струи характер ее разрушения может быть различным. Экспериментальное исследование пульсирующей струи выполнено в работе [19]. В [20] изучена динамика образования головной части струи грибообразной формы при впрыскивании струи жидкости в газ. В работах [21–28] численно и экспериментально исследовано поведение струи жидкости при наличии соосной сопутствующей струи газа и в ее отсутствие.

В данной работе с использованием метода жидких объемов изучается влияние кольцевого потока газа на поведение возмущенной струи жидкости. Следует отметить, что результаты экспериментальных исследований такого течения отсутствуют.

Численный метод. Поведение струи жидкости и соосного потока газа исследуется методом жидких объемов в предположении, что струя и газ образуют одну фазу. В этом методе две несмешивающиеся жидкости рассматриваются как одна несжимаемая фаза с переменными эффективными плотностью и вязкостью, которые на границе жидкостей могут быть разрывными. Моделирование выполнено с использованием платформы openFoam.

Описание метода жидких объемов приведено в работе [29]. Уравнение движения несжимаемой жидкости и уравнение для объема фракции α ($\alpha = 1$ для жидкости, $\alpha = 0$ для газа, $0 < \alpha < 1$ на границе раздела) решались с использованием решателя interFoam. Уравнения для несжимаемого жидкого объема можно записать в виде

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad \frac{\partial \rho \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) = \nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \bar{\mathbf{u}} + \nabla \bar{\mathbf{u}}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F},$$

$$\rho = \alpha \rho_l + \rho_g(1 - \alpha), \quad \mu = \alpha \mu_l + \mu_g(1 - \alpha), \quad \mathbf{F} = \sigma k \nabla \alpha, \quad k = -\nabla \cdot (|\nabla \alpha|^{-1} \nabla \alpha),$$

где ρ — плотность; μ — вязкость; \mathbf{F} — сила поверхностного натяжения, определяемая как функция растягивающего поверхностного напряжения σ , кривизны поверхности k и градиента объемной доли α . В методе жидких объемов уравнение для объемной доли содержит

дополнительное конвективное слагаемое:

$$\frac{\partial}{\partial t} \alpha + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{u}) + \nabla \cdot [\mathbf{u}_r \alpha (1 - \alpha)] = 0.$$

Здесь \mathbf{u}_r — поле скоростей, сжимающее межфазную поверхность и определяемое по формуле [30]

$$u_r = \min(c_\alpha |u|, \max(u)) |\nabla \alpha|^{-1} \nabla \alpha,$$

c_α — коэффициент сжатия (в данной работе значение c_α принимается равным единице). Уравнение переноса объемной доли решается с использованием мультиразмерного универсального решателя совместно с явной схемой решения [29]. На каждом шаге по времени связанная система уравнений Навье — Стокса решалась с использованием алгоритма PISO. В настоящей работе максимальное значение числа Куранта составляло 0,2. Соответствующий этому числу шаг по времени равен 10^{-8} .

Исследовалось влияние на поведение потока чисел Рейнольдса Re , Вебера We , Струхалы Sr , отношения скорости газа к скорости жидкости \hat{u} , коэффициента модуляции ε_l и безразмерного времени t^* , которые определены следующим образом:

$$Re = \frac{\rho_l U_l R_l}{\mu_l}, \quad We_g = \frac{\rho_g U_l^2 R_l}{\sigma}, \quad Sr_l = \frac{2\pi R_l f_l}{U_l}, \quad \hat{u} = \frac{U_g}{U_l},$$

$$\varepsilon_l = \frac{u'_l}{U_l}, \quad t^* = \frac{U_l t}{2R_l}, \quad Sr_g = \frac{2\pi R_g f_g}{U_g}, \quad \varepsilon_g = \frac{u'_g}{U_g}$$

(индексы l, g соответствуют жидкости и газу; f — частота возмущения; u' — амплитуда скорости возмущения; U — скорость установившегося течения). В качестве характерной длины принят радиус струи R .

Область вычислений. Установка состоит из двухжидкостного коаксиального распылителя, впрыскивающего жидкий этанол и газ в покоящийся газ. Впрыскиваемый и покоящийся газы одинаковы. Внутренний диаметр инжектора, через который впрыскивается жидкость, равен $D_l = 0,2$ мм, толщина стенки инжектора — 0,03 мм. Внутренний инжектор помещен во внешний инжектор диаметром $D_g = 1$ мм, через который впрыскивается газ. Размеры расчетной области составляют $10D_l$ в радиальном направлении и $12D_l$ в направлении потока. Область численного моделирования приведена на рис. 1. Осесимметричная задача решается в области, представляющей собой одну ячейку в азимутальном направлении с углом раствора $\theta = 3^\circ$ (см. рис. 1, б).

На стенках ячейки ставятся периодические краевые условия. На верхней и нижней границах области в направлении потока задается давление, соответствующее свободному потоку. На стенках ставятся условия неприлипания, на входе задаются скорости жидкости и газа. Осесимметричная постановка задачи позволяет уменьшить вычислительные затраты, необходимые для получения решения, но при этом не учитывается ряд характеристик процесса. Характеристики жидкости и газа приведены в таблице. Продольные возмущения моделируются наложением на скорость жидкости на входе синусоидального возмущения. Используются следующие значения безразмерных параметров: $Re_l = 2132,21$, $We_g = 1,77$, $Sr_l = 1,57$, $\varepsilon_l = \varepsilon_g = 0; 0,1; 0,2; 0,3$, $\hat{u} = 0; 0,10; 0,25; 0,50$.

Результаты исследования и их обсуждение. Представленные ниже результаты получены с использованием программ C++ (openFoam 2017). Возмущения скорости приводят к образованию на поверхности струи областей с замедленным и ускоренным движением жидкости [15–18]. Уменьшение площади поперечного сечения струи вниз по течению обусловлено растяжением поверхности струи в радиальном направлении. Длина области растяжения в радиальном направлении соответствует длине волны возмущения.

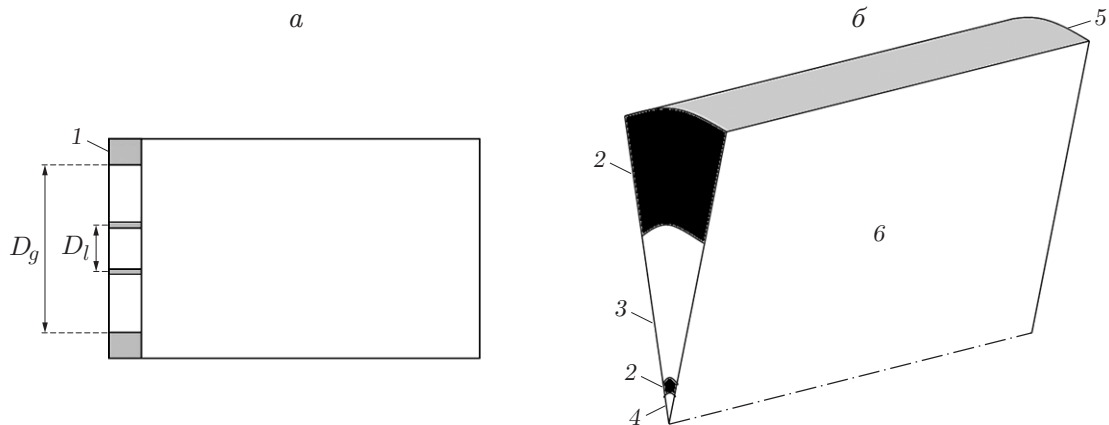


Рис. 1. Схема расчетной области и краевые условия:
a — вид сбоку (двумерное изображение), *б* — изометрическое изображение области, представляющей собой цилиндрический сектор; 1 — стенка, 2 — жесткая стенка, 3 — вход струи газа, 4 — вход струи жидкости, 5 — давление на выходе, 6 — ячейка периодичности

Характеристики жидкости и газа

Среда	ρ , кг/м ³	$\mu \cdot 10^5$, Па · с	σ , Н/м	D , мм
Жидкость	786	73,726	0,0225	0,2
Газ	1	1,480	—	1,0

На рис. 2,*a* видно, что вследствие растяжения поверхности струи и взаимодействия газа и жидкости при впрыскивании струи жидкости в покоящийся газ образуются утолщения струи. В этом случае форма головной части струи аналогична форме головной части струи в модели разрушения, предложенной Рэлеем. Некоторое различие этих форм объясняется различием скоростей возмущения. На рис. 2,*б* показана форма струи жидкости, инжектируемой вместе с коаксиальным течением газа в покоящийся газ. Очевидно, что головная часть струи становится толще, а связки образуют больший угол с ядром струи жидкости. При скорости газа, равной половине скорости струи, газ проникает в ядро (наибольшая глубина проникания имеет место позади выпуклостей), что приводит к ее полному распылению (рис. 2,*в*). При $t^* = 10$ и скорости сопутствующего газа $\hat{u} = 0,1$ происходит растяжение головной части струи, позади нее образуются утолщения (рис. 2,*ж*). При $\hat{u} = 0,25$ форма головной части струи становится грибовидной, на краях образуются связки, распадающиеся на капли (рис. 2,*з*). Вследствие наличия завихренного течения Кельвина — Гельмгольца позади головной части струи образуются два “пальца”. Такая форма разрушения отличается от формы разрушения в соответствии с моделью Рэлея. Также вниз по течению возникает неустойчивость на поверхности струи.

На рис. 3 представлены результаты моделирования поведения струи жидкости, впрыскиваемой совместно с коаксиальной струей газа и без струи газа. При наличии сопутствующей струи толщина связок уменьшается, а угол между ними и ядром струи увеличивается. На связках вследствие течения газа образуются капиллярные волны. При больших амплитудах колебаний волн от кончиков связок отделяются материнские и сателлитные капли, количество которых при наличии сопутствующей струи газа больше, чем в ее отсутствие.

На рис. 4 приведены распределения скорости в осевом направлении на различных расстояниях от оси струи (x/D — отношение расстояния от форсунки до точки, в которой измерялась скорость, к диаметру струи жидкости, r/D — отношение расстояния от оси

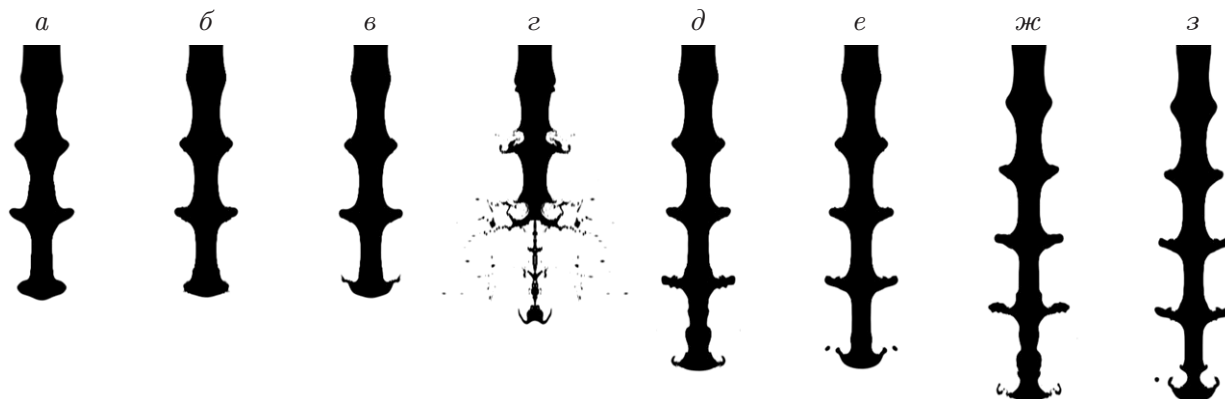


Рис. 2. Модулированная струя жидкости при $\varepsilon = 0,1$, $Sr_l = 1,57$:
 $a-z - t^* = 7$ ($a - \hat{u} = 0$, $b - \hat{u} = 0,1$, $в - \hat{u} = 0,25$, $z - \hat{u} = 0,5$), $d, e - t^* = 9$ ($d - \hat{u} = 0,1$, $e - \hat{u} = 0,25$), $ж, з - t^* = 10$ ($ж - \hat{u} = 0,1$, $з - \hat{u} = 0,25$)

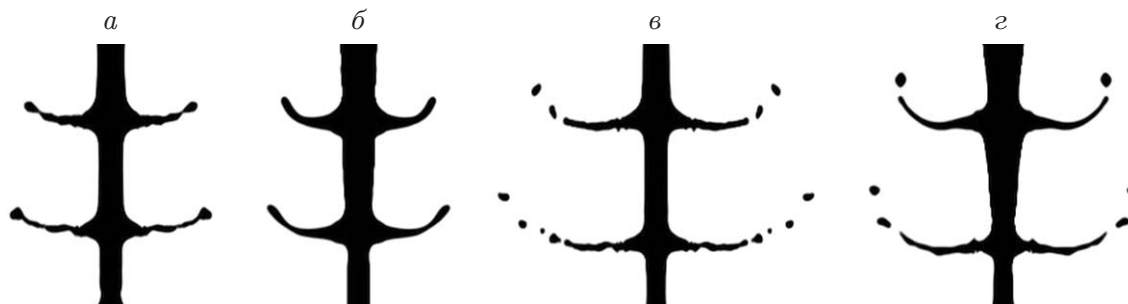


Рис. 3. Модулированная струя жидкости при $Sr_l = 1,57$, $t^* = 10$:
 $a, б - \varepsilon = 0,2$ ($a - \hat{u} = 0,25$, $б - \hat{u} = 0$), $в, z - \varepsilon = 0,3$ ($в - \hat{u} = 0,25$, $z - \hat{u} = 0$)

струи в радиальном направлении к диаметру струи жидкости). При моделировании течения газа число Струхала и амплитуда возмущений были теми же, что и для струи жидкости. На рис. 4 видно, что вблизи поверхности раздела фаз осевая скорость зависит как от свойств жидкости, так и от свойств газа, максимальная скорость имеет место позади головной части струи жидкости.

На рис. 5 приведены зависимости угла раствора струи от коэффициента модуляции при различных значениях амплитуды возмущения ее скорости. При увеличении амплитуды возмущения скорости сопутствующей струи газа до значения $\hat{u} = 0,25$ угол раствора увеличивается, при дальнейшем увеличении амплитуды это увеличение становится более существенным.

Зависимость отношения длины связей L_{lig} к их диаметру D_{lig} от расстояния от форсунки x/D приведена на рис. 6. Видно, что с увеличением x/D это отношение увеличивается. Скорость увеличения L_{lig}/D_{lig} уменьшается с увеличением x/D . С увеличением амплитуды возмущения скорости потока газа толщина связей уменьшается, что способствует образованию капель.

Заключение. В работе выполнено численное моделирование поведения струи жидкости при наличии возмущения и низкоскоростного кольцевого течения газа. При решении осесимметричной задачи рассматривается одна ячейка в азимутальном направлении с условиями периодичности на ее боковых поверхностях. На входе на скорости течения жидкости и газа накладываются синусоидальные возмущения. Исследовано влияние различных параметров задачи на характер разрушения струи жидкости.

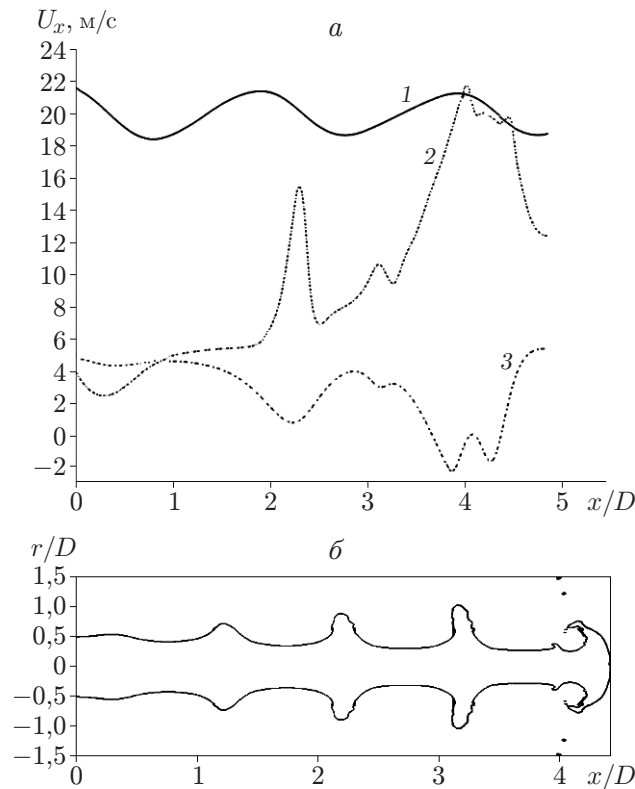


Рис. 4. Распределение скорости в осевом направлении на различных расстояниях от оси струи (а) и форма струи (б) при $\varepsilon_l = \varepsilon_g = 0,1$, $Sr_l = Sr_g = 1,57$, $\hat{u} = 0,25$, $t^* = 8,5$:

1 — $r/D = 0,25$, 2 — $r/D = 0,75$, 3 — $r/D = 1,00$

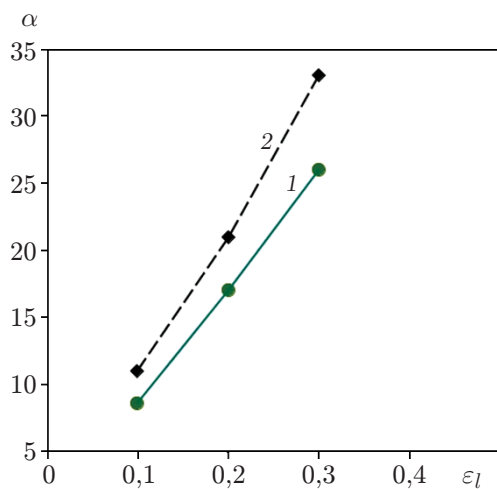


Рис. 5

Рис. 5. Зависимость угла раствора струи от коэффициента модуляции при различных значениях амплитуды возмущения ее скорости:

1 — $\hat{u} = 0$, 2 — $\hat{u} = 0,25$

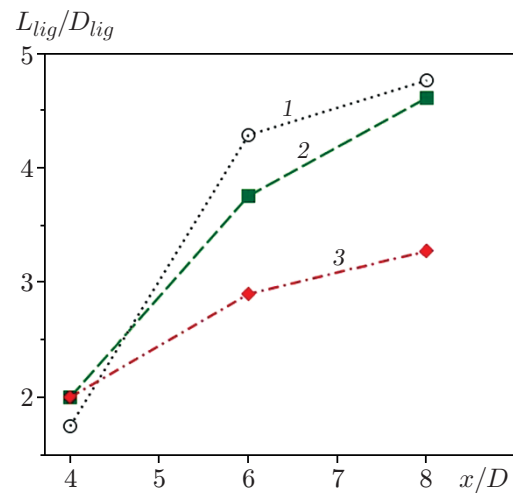


Рис. 6

Рис. 6. Зависимость отношения длины связок к их диаметру от расстояния от форсунки при $\varepsilon_l = 0,1$, $Sr_l = 1,57$, $\hat{u} = 0,25$:

1 — $\varepsilon_g = 0$, 2 — $\varepsilon_g = 0,1$, 3 — $\varepsilon_g = 0,2$

Основные результаты исследования можно сформулировать следующим образом. Соосное течение газа оказывает существенное влияние на форму головной части струи и процесс образования капель. Неустойчивость струи жидкости увеличивается с увеличением скорости газа. Струя жидкости полностью разрушается при скорости газа, равной половине скорости струи жидкости. Течение соосного потока газа существенно влияет на поведение струи жидкости даже в том случае, когда его скорость меньше скорости струи жидкости. Влияние кольцевого течения газа на поведение струи возрастает с увеличением вынужденных возмущений, накладываемых на струю жидкости. Число образовавшихся капель, их диаметр и угол раствора струи существенно зависят от амплитуды возмущений. Возмущения, накладываемые на поток газа на входе, приводят к уменьшению толщины и растяжению связок, в результате чего образуется большее количество капель.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Savart F.** Mémoire sur la constitution des veines liquides lancées par des orifices circulaires en mince paroi // *Ann. Chim. Phys.* 1833. V. 53. P. 337–386.
2. **Plateau J.** *Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires.* P.: Gauthier-Villars, 1873. V. 2.
3. **Strutt J. W. (Rayleigh).** On the instability of jets // *Proc. London Math. Soc.* 1878. V. 10. P. 4–13.
4. **Weber C.** Zum zerfall eines flüssigkeitsstrahles // *Z. angew. Math. Mech.* 1931. Bd 11. S. 136–154.
5. **Lafrance P.** Nonlinear breakup of a laminar liquid jet // *Phys. Fluids.* 1975. V. 18, N 4. P. 428–432.
6. **Sirignano W. A., Mehring C.** Review of theory of distortion and disintegration of liquid streams // *Progr. Energy Combust. Sci.* 2000. V. 26. P. 609–655.
7. **Lin S. P., Reitz R. D.** Drop and spray formation from a liquid jet // *Annual Rev. Fluid Mech.* 1998. V. 30. P. 85–105.
8. **Ashgriz N., Yarin A. L.** *Capillary instability of free liquid jets* // *Handbook of atomization and sprays.* S. l.: Springer, 2011. P. 3–53.
9. **Crane L., Birch S., McCormack P. D.** The effect of mechanical vibration on the break-up of a cylindrical water jet in air // *British J. Appl. Phys.* 1964. V. 15. P. 750–763.
10. **McCormack P. D., Crane L., Birch S.** An experimental and theoretical analysis of cylindrical liquid jets subjected to vibration // *British J. Appl. Phys.* 1964. V. 16. P. 395–408.
11. **Meier G., Loose S., Stasicki B.** Unsteady liquid jets // *Fascinat. Fluid Dynamics.* 1998. V. 45. P. 207–216.
12. **Heister S., Rutz M., Hilbing J.** Effect of acoustic perturbations on liquid jet atomization // *J. Propuls. Power.* 1997. V. 13. P. 82–88.
13. **Chaves H., Obermeier F., Seidel T.** Fundamental investigation of disintegration of a sinusoidally forced liquid jet // *Proc. of the 8th Intern. conf. on liquid atomization and spray systems, Pasadena (USA), 16–20 July 2000.* Pittsburg: Carnegie Mellon Univ., 2000. P. 1018–1025.
14. **Chaves H., Glate H., Obermeier F., et al.** Disintegration of sinusoidally forced liquid jet // *Proc. of the 16th Annual conf. on liquid atomization and spray systems, Darmstadt (Germany), Sept. 2000.* Darmstadt: Tech. Univ., 2000. P. II-6.1–II-6.6.
15. **Geschner F., Obermier G., Chaves H.** Investigation of different phenomena of the disintegration of a sinusoidally forced liquid jet // *Proc. of the 17th Annual conf. on liquid atomization and spray systems, Zurich (Switzerland), 2–6 Sept. 2001.* S. l., 2001.

16. **Srinivasan V., Salazar A. J., Saito K.** Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology // *Appl. Math. Modelling*. 2011. V. 35. P. 3710–3730.
17. **Yang X., Turan A.** Simulation of liquid jet atomization coupled with forced perturbation // *Phys. Fluid*. 2017. V. 29. 022103.
18. **Zhu Y. H., Xiao F., Li Q. L., et al.** LES of primary breakup of pulsed liquid jet in supersonic crossflow // *Acta Astronaut.* 2019. V. 154. P. 119–132.
19. **Lee I. C., Kang Y. S., Moon H. J., et al.** Spray jet penetration and distribution of modulated liquid jets in subsonic cross-flows // *J. Mech. Sci. Technol.* 2010. V. 24. P. 1425–1431.
20. **Shinjo J., Umemura A.** Simulation of liquid jet primary breakup: Dynamics of ligament and droplet formation // *Intern. J. Multiphase Flow*. 2010. V. 36. P. 513–532.
21. **Shinjo J., Umemura A.** Detailed simulation of primary atomization mechanisms in Diesel jet sprays (isolated identification of liquid jet tip effects) // *Proc. Combust. Inst.* 2011. V. 33. P. 2089–2097.
22. **Zandian A., Sirignano W. A., Hussain F.** Dynamics of a spatially developing liquid jet with slower coaxial gas flow // *Proc. of the 14th Triennial intern. conf. on liquid atomization and spray systems, Chicago (USA), 22–26 July 2018. S. 1., 2018. P. 1–8.*
23. **Mayer W. O. H.** Coaxial atomization of a round liquid jet in a high speed gas stream: A phenomenological study // *Experiments Fluids*. 1994. V. 16. P. 401–410.
24. **Mayer W. O. H., Branam R.** Atomization characteristics on the surface of a round liquid jet // *Experiments Fluids*. 2004. V. 36. P. 528–539.
25. **Ficuciello A., Baillet F., Blaisot J. B., Richard C.** Investigation of air-assisted sprays submitted to high frequency transverse acoustic fields: Droplet clustering // *Phys. Fluid*. 2017. V. 29. 067103.
26. **Lasheras J. C., Hopfinger E. J.** Liquid jet instability and atomization in a coaxial gas stream // *Annual Rev. Fluid Mech.* 2000. V. 32. P. 275–308.
27. **Kim D., Desjardin O., Herrmann M., Moin P.** Toward two-phase simulation of the primary breakup of a round liquid jet by a coaxial flow of gas // *Annual research briefs. Stanford: Center for Turbulence Res.*, 2006. P. 185–195.
28. **Kumar A., Sahu S.** Liquid jet breakup unsteadiness in a coaxial air-blast atomizer // *Intern. J. Spray Combust. Dynamics*. 2018. V. 10. P. 221–230.
29. **Deshpande S. S., Anumolu L., Trujillo M. F.** Evaluating the performance of the two-phase flow solver interFoam // *Comput. Sci. Discovery*. 2012. V. 5. 014016.
30. **Berberovic E.** Investigation of free-surface flow associated with drop impact: Numerical simulations and theoretical modeling: Ph. D. thesis. Darmstadt: Tech. Univ., 2010.

*Поступила в редакцию 18/III 2020 г.,
после доработки — 20/V 2020 г.
Принята к публикации 25/V 2020 г.*
