

УДК 004.942

PACS: 61.20.Ja, 61.20.Gy, 47.15.Fe,
47.15.Rq, 51.50.+V

Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца и магнитно-гидродинамическая неустойчивость цилиндрического столба

*В. Д. Сарычев, С. А. Невский, М. А. Кузнецов, С. А. Солодский,
Д. П. Ильященко, Е. В. Верхотурова*

В данной работе рассмотрено совместное воздействие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и магнитно-гидродинамической неустойчивости на цилиндрический столб расплавленного металла, а также формирование и отрыв жидкой капли от него в зависимости от времени. Метод определения неустойчивости поверхности цилиндрического столба жидкости с плотностью и динамической вязкостью окруженного газовой средой. Целью настоящей работы является определение входных параметров, при которых реализуется микрометровый диапазон длин волн возмущений. Определены условия возникновения и развитие на поверхности жидкого металла тонких жидких прослоек с поверхностно-периодическим рельефом (микроволны) микро- и нанометрового диапазона, возникающего при подаче металлических проволок в зону гетерогенной плазмы электрической дуги в условиях действия неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца. Установлено, что для силы тока 100 А и для 300 А сила Лоренца не оказывает никакого влияния на гидродинамику неустойчивости. При скоростях ~6 м/с поверхность устойчива и тока 300 А недостаточно для формирования неустойчивости. Для развития МГД неустойчивости необходимы силы тока порядка 1000 А. Определено, что основную роль в разрушении струи на капли играет – возмущение коэффициента поверхностного натяжения, т. е. термокапиллярный эффект.

Ключевые слова: математическое моделирование, неустойчивость Кельвина-Гельмгольца, магнитно-гидродинамическая неустойчивость, цилиндрический столб, уравнение, газовая струя, расплавленный металл.

Ссылка: Сарычев В. Д., Невский С. А., Кузнецов М. А., Солодский С. А., Ильященко Д. П., Верхотурова Е. В. // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 5.

Reference: V. D. Sarychev, S. A. Nevskiy, M. A. Kuznetsov, S. A. Solodsky, D. P. Ilyashchenko, and E. V. Verkhoturva, Applied Physics, No. 3, 5 (2020).

Введение

Явления распада жидкой струи на капли, обусловленные обтеканием концентрической

кольцевой газовой струей, являются повсеместными как в промышленных процессах, так и в природных явлениях. При больших скоростях истечения струи происходит меха-

Сарычев Владимир Дмитриевич¹, доцент, к.т.н.
Невский Сергей Андреевич¹, доцент, к.т.н.
Кузнецов Максим Александрович², старший преподаватель, к.т.н.

Солодский Сергей Анатольевич², доцент, к.т.н.
Ильященко Дмитрий Павлович², доцент, к.т.н.
Верхотурова Елена Викторовна³, доцент, к.х.н.

¹ Сибирский государственный индустриальный университет.
Россия, 654007, г. Новокузнецк, Кемеровская обл., ул. Кирова, 42.

E-mail: sarychev_vd@mail.ru

² Юргинский технологический институт Томского политехнического университета.
Россия, 652055, г. Юрга, Кемеровская обл., ул. Ленинградская, 26.

E-mail: mita8@rambler.ru

³ Иркутский национальный исследовательский технический университет.
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Статья поступила в редакцию 04 мая 2020 г.

© Сарычев В. Д., Невский С. А., Кузнецов М. А., Солодский С. А., Ильященко Д. П., Верхотурова Е. В., 2020

низ неустойчивости, обусловленный скольжением слоев струи и окружающей среды [1–5].

Математическое моделирование в настоящее время рассматривается как средство теоретического исследования нелинейных проблем в различных областях науки. Оно применяется в ситуациях, когда постановка натурального эксперимента невозможна, очень сложна или очень дорога [6–10].

Поэтому главной задачей теоретической части настоящего исследования явилось определение входных параметров, при которых реализуется два максимума и как следствие, микрометровый диапазон длин волн возмущений.

В данной работе рассмотрение совместного действия неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца и магнитно-гидродинамической неустойчивости.

Методика проведения расчетов

Рассмотрим подробнее неустойчивость цилиндрического столба расплава плотностью ρ_1 и радиуса R_1 , обтекаемого газом плотностью ρ_2 со скоростью V_{gas} в электромагнитном поле, образованном протекающим током I_0 (рис. 1).

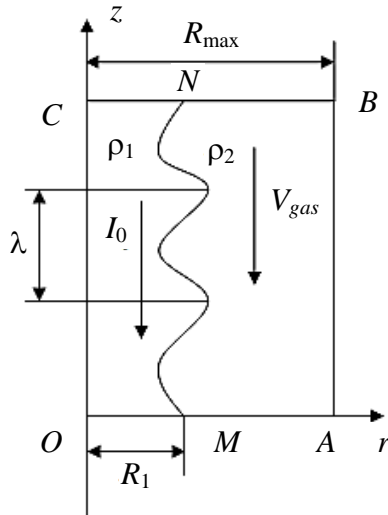


Рис. 1. Схема неустойчивости поверхности цилиндрического столба.

Течение расплава описывается уравнением Навье-Стокса для вязкой несжимаемой среды:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \mu \Delta \vec{u} + \vec{F}_L \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0$$

где \vec{v} – вектор скорости; p – давление; \vec{F}_L – сила Лоренца; ρ – плотность; μ – динамическая вязкость.

При решении электромагнитной задачи требуется вычислить силу Лоренца $\vec{F}_L = \vec{J} \times \vec{B}$. Эта задача решается путем использования классических уравнений Максвелла, используя электрический потенциал V и векторный магнитный потенциал \vec{A} :

$$\nabla \cdot \left(\sigma \nabla V + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \right) = 0;$$

$$\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \frac{1}{\mu_0} \nabla \times (\nabla \times \vec{A}) + \sigma \nabla V = 0 \quad (2)$$

$$\vec{E} = -\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}, \quad \vec{J} = \sigma \vec{E};$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}, \quad \vec{F}_L = \vec{J} \times \vec{B}$$

где \vec{E} – напряженность электрического поля; \vec{B} – магнитная индукция; σ – удельная проводимость.

Данная система решалась численно в цилиндрической системе координат с помощью метода конечных элементов. Для отслеживания поверхности раздела между расплавом и газом использовался консервативный LevelSet метод. Метод заключается в расчете скалярной функции ϕ на всей области:

$$\rho \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{u}) \right) =$$

$$= \gamma \left[\varepsilon \nabla \cdot \nabla \phi - \nabla \cdot \left(\phi (1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right) \right] \quad (3)$$

где ε – параметр определяющий толщину переходного слоя и равный половине размера ячейки сетки; γ – стабилизирующий параметр равный максимальной скорости достигаемой в области расчета.

В переходной зоне производится аппроксимация плотности, вязкости, электропроводности:

$$\rho = \rho_1 + (\rho_2 - \rho_1) \phi$$

$$\mu = \mu_1 + (\mu_2 - \mu_1) \phi \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_1 + (\sigma_2 - \sigma_1) \phi.$$

Сила поверхностного натяжения рассчитывается по формуле:

$$\mathbf{F}_{st} = \nabla \cdot \left[\left(\gamma (\mathbf{I} - \mathbf{nn}^T) \right) \delta \right],$$

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}, \quad \gamma = |\phi(1-\phi)| |\nabla \phi| \quad (5)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица; \mathbf{n} – вектор нормали к поверхности; γ – коэффициент поверхностного натяжения; δ – дельта функция Дирака которая не равна нулю только на контактной поверхности.

Начальные и граничные условия:

в начальный момент времени расплав находится в покое, а газ натекает с возмущенной скоростью V_{gas} :

$$\begin{aligned} u_1(0) &= 0, \\ w_1(0) &= 0 \\ u_2(0) &= -A \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right) V_{gas}, \\ w_2(0) &= V_{gas} \end{aligned} \quad (6)$$

где A – относительная амплитуда возмущения скорости, в расчетах бралась равной $A = 0,1$;

на границе задавались граничные условия, представленные в табл. 1.

В расчетных экспериментах сила электрического тока бралась $I_0 = 100$ А. В табл. 2 представлены физические свойства расплава и обтекающего газа.

Таблица 1

Граничные условия

Граница	Уравнение	Описание
ОА, СВ	$\mathbf{u}_{OA} = \mathbf{u}_{CB}$ $p_{OA} = p_{CB}$	Периодические граничные условия
ОА, СВ	$V_{OM} = 0$ $\vec{J}_{CN} = J_0 = \frac{I_0}{\pi R_1^2}$	Напряжение
АВ	$u_2 = 0$ $w_2 = V_{gas}$	Скорость обтекающего газа
ОС	$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{n}} = 0$	Ось симметрии

Таблица 2

Физические свойства расплава и обтекающего газа

Обозначение	Описание	Значение
ρ_1	Плотность расплава металла	7850 кг м ⁻³
ρ_2	Плотность газа	1 кг м ⁻³
σ_1	Электропроводность расплава металла	4,032·10 ⁶ Ом ⁻¹ м ⁻¹
σ_2	Электропроводность газа	1,0997·10 ⁻¹⁰ Ом ⁻¹ м ⁻¹
μ_1	Коэффициент динамической вязкости расплава металла	0,0052 Па с
μ_2	Коэффициент динамической вязкости газа	5×10 ⁻⁵ Па с
V_{gas}	Скорость обтекания газа	6 м с ⁻¹

Обсуждение полученных результатов

На рис. 2 представлено формирование, и отрыв капли расплава от цилиндрического

столба в зависимости от времени. Возмущения радиальной скорости приводят к возникновению волн на поверхности расплава (рис. 2, а, б). Гребни волн оказываются неус-

тойчивыми (рис. 2, в, г) и потоки газа срывают с них тороидальные капли расплава, представленные на рис. 3.

На рис. 4 изображено распределение плотности тока в расплаве в момент времени

$t = 0,5$ м/с. В центральной части расплава ток имеет равномерное распределение и достигает своего максимального значения, когда на возмущенной поверхности плотность силы тока в несколько раз меньше.

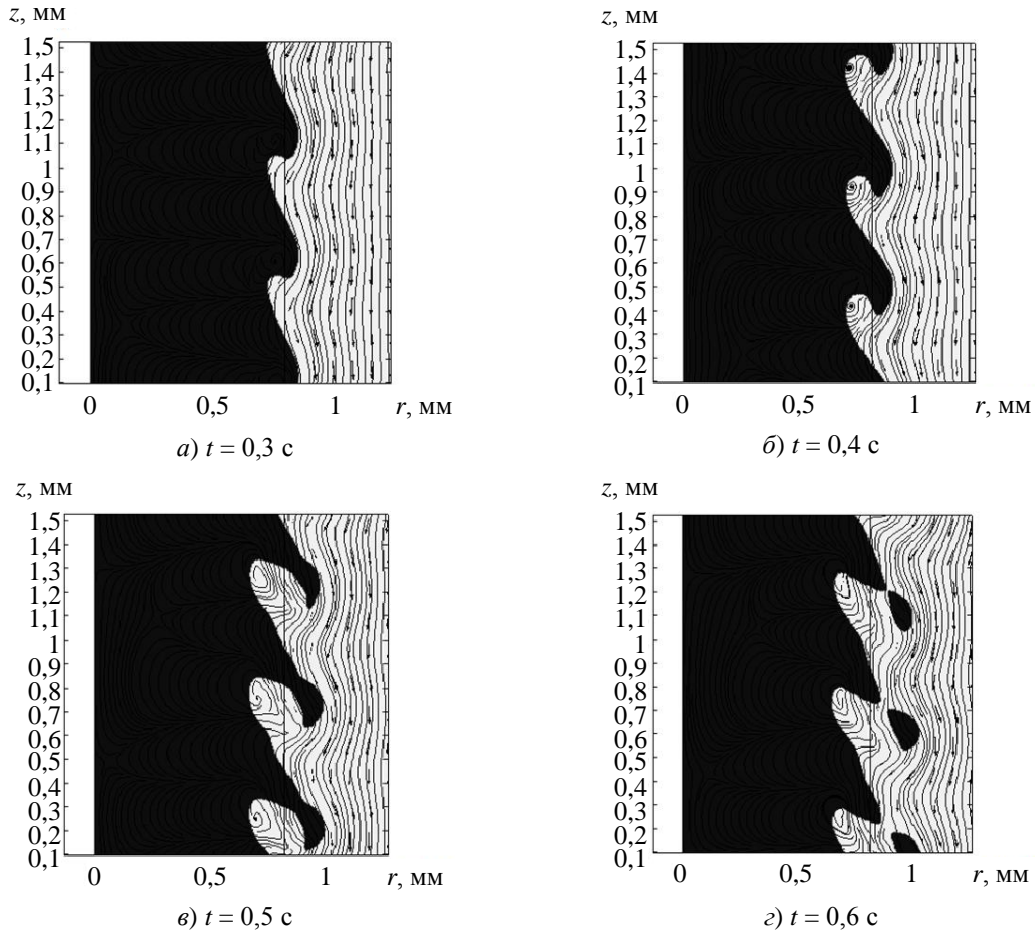


Рис. 2. Развитие неустойчивости и отрыв капель расплава.

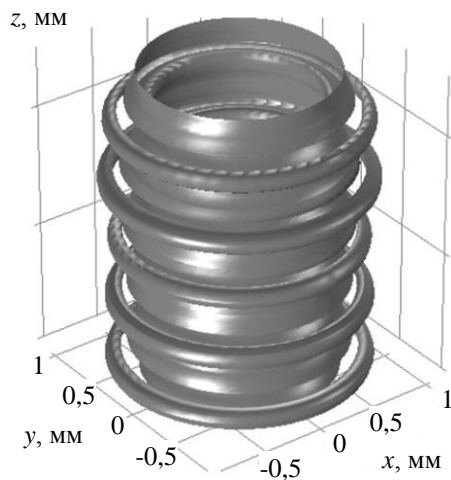


Рис. 3. Поверхность расплава в момент отрыва тороидальных капель $t = 0,6$ с.

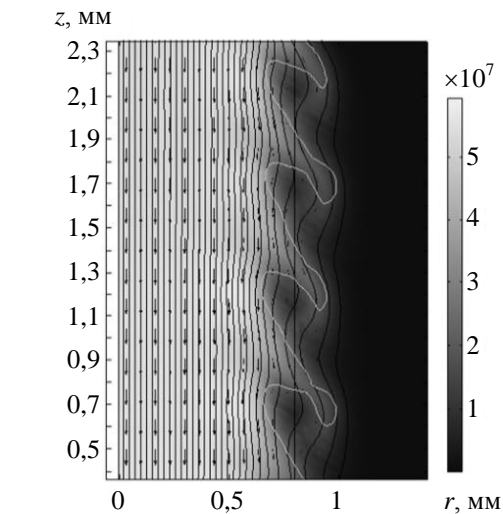


Рис. 4. Линии электрического тока и векторное поле плотности тока в момент времени $t = 0,5$ с.

Заключение

1. Определены условия возникновения и развитие на поверхности жидкого металла тонких жидких прослоек с поверхностно-периодическим рельефом (микроволны) микро- и нанометрового диапазона, возникающего при подаче металлических проволок в зону гетерогенной плазмы электрической дуги в условиях действия неустойчивостей Кельвина-Гельмгольца. При использовании рабочего элемента формирующего необходимые направления движения плазменных потоков совместно с высокочастотным (ультразвуковым) воздействием, возникает дополнительное магнитно-гидродинамическое воздействие ориентированных плазменных потоков на тонкую прослойку жидкого металла, что позволит получить поток микро- и нанокпель на подложку (мишень).

2. Для силы тока 100 А и для 300 А сила Лоренца не оказывает никакого влияния на гидродинамику неустойчивости. При скоростях ~ 6 м/с поверхность устойчива и тока 300 А недостаточно для формирования неустойчивости. Для развития МГД неустойчивости необходимы силы тока порядка 1000 А. Расчеты с тонким слоем (10 мкм) показали, что основную роль в разрушении струи на капли играет – возмущение коэффициента поверхностного натяжения, т. е. термокапиллярный эффект. Исходя из этого результата в дальнейшем при создании исполнительного оборудования необходимо вводить импульсное питание плазмотрона. И дополнить исследова-

ния по влиянию амплитудного изменения силы Лоренца на развития МГД.

Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда
(проект № 18-79-10035).

ЛИТЕРАТУРА

1. Eggers J., Villermaux E. // Reports on Progress in Physics. 2008. Vol. 71 (3). P. 036601. DOI: 10.1088/0034-4885/71/3/036601
2. Hornung J., Zikin A., Pichelbauer K., Kalin M., Kirchgaßner M. // Materials Science and Engineering A. 2013. Vol. 576. P. 243. DOI: 10.1016/j.msea.2013.04.029
3. Heath G. R., Tremblay A., Andersson P., Morquecho A. / Innovative coating developments using a new, user friendly HVOF and metal based powders. // Proceedings of the International Thermal Spray Conference. 2012. P. 98.
4. Katsich C., Badisch E., Roy M., Heath G. R., Franek F. // Wear. 2009. Vol. 267 (11). P. 1856. DOI: 10.1016/j.wear.2009.03.004
5. Zhang T., Li Z., Young F., Kim H.J., Li H., Jing H., Tillmann W. // ISIJ International. 2014. Vol. 54 (7). P. 1472. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.1472>
6. Tashev P., Koprinkova-Hristova P., Petrov T., Kirilov L., Lukarski Y. // Journal of Materials Science and Technology. 2016. Vol. 24 (4). P. 230.
7. Peng J., Yang L. // CIESC J. 2016. Vol. 67 (S1). P. 117.
8. Bilenko G. A., Khaibrakhmanov R. U., Korobov Y. S. // Metallurgist. 2017. Vol. 61. P. 265.
9. Kumar N., Bandyopadhyay A. // Lasers in Engineering. 2017. Vol. 36 (4). P. 225.
10. Chinakhov D. A., Vorobjev A. V., Davydov A. A., Tomchik A. A. // Materials Science Forum. 2013. Vol. 762. P. 117. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357711

PACS: 61.20.Ja, 61.20.Gy, 47.15.Fe, 47.15.Rq, 51.50.+V

Kelvin-Helmholtz instability and magneto-hydrodynamic instability of a cylindrical column

V. D. Sarychev¹, S. A. Nevskiy¹, M. A. Kuznetsov², S. A. Solodskij², D. P. Ilyaschenko²,
E. V. Verkhoturova³

¹ Siberian State Industrial University
42 Kirov st., Novokuznetsk, 654007, Russia

² Yurga Institute of Technology National Research Tomsk Polytechnic University
26 Leningrad st., Yurga, 652055, Russia

³ Irkutsk National Research Technical University
83 Lermontova st., Irkutsk, 664074, Russia

Received May 04, 2020

In this paper, we consider the combined effect of Kelvin-Helmholtz instability and magnetic hydrodynamic instability on a cylindrical column of molten metal, as well as the formation and separation of a liquid droplet from it depending on time. A method for determining the instability of the surface of a cylindrical column of liquid with density and dynamic viscosity surrounded by a gas medium. The purpose of this work is to determine the input parameters at which the micrometer range of wavelengths of disturbances is realized. The conditions of occurrence and development on the surface of liquid metal of thin liquid layers with surface-periodic relief (microwave) of the micro- and nanometer range arising when metal wires are fed into the zone of heterogeneous plasma of an electric arc under the action of Kelvin-Helmholtz instabilities are determined. It is established that for the current strength of 100 A and 300 A the Lorentz force has no effect on the hydrodynamics of instability. At speeds of ~6 m/s, the surface is stable and 300 A current is not enough to form instability. For the development of the MHD instability necessary current of about 1000 A. it is determined that the main role in the destruction of the jet into droplets plays a perturbation of surface tension, i. e., thermo capillary effect.

Keywords: mathematical modeling, Kelvin-Helmholtz instability, magnetic-hydrodynamic instability, cylindrical column, equation, gas jet, molten metal.

REFERENCES

1. J. Eggers and E. Villermaux, Reports on Progress in Physics. **71**(3), 036601 (2008). DOI: 10.1088/0034-4885/71/3/036601
2. J. Hornung, A. Zikin, K. Pichelbauer, M. Kalin and M. Kirchgaßner, Materials Science and Engineering A. **576**, 243. (2013). DOI: 10.1016/j.msea.2013.04.029
3. G.R. Heath, A. Tremblay, P. Andersson and A. Morquecho, *Innovative coating developments using a new, user friendly HVOF and metal based powders. Proceedings of the International Thermal Spray Conference*. 98 (2012)
4. C. Katsich, E. Badisch, M. Roy, G. R. Heath and F. Franek, Wear. **267**(11), 1856 (2009). DOI: 10.1016/j.wear.2009.03.004
5. T. Zhang, Z. Li, F. Young, H. J. Kim, H. Li, H. Jing, and W. Tillmann, ISIJ International. **54** (7), 1472 (2014). <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.1472>
6. P. Tashev, P. Koprinkova-Hristova, T. Petrov, L. Kirilov, and Y. Lukarski, J. Mater. Sci. Technol **24** (4), 230 (2016).
7. J. Peng, and L. Yang, CIESC J. **67** (S1), 117 (2016).
8. G. A. Bilenko, R. U. Khaibrakhmanov, and Y. S. Korobov, Metallurgist **61**, 265 (2017).
9. N. Kumar, and A. Bandyopadhyay, Lasers in Engineering **36** (4), 225 (2017).
10. D. A. Chinakhov, A. V. Vorobjev, and A. A. Tomchik, Materials Science Forum **762**, 117 (2013). DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357711