

Г. Гербет, Х. Лангенбруннер, Р. Лоцманн, С. Экерт *

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ

Some recent results of studies of two-phase liquid metal MHD flows have been presented. A 1D code was developed for an overall description of the flow parametrs. The mean slip ratio can be significantly changed by an external magnetic field. The lateral dispersion process of bubbles has been experimentally studied in a laboratory sodium test facility. A pronounced focussing effect of the magnetic field was verified with different strength in the directions parallel and perpendicular to the field.

Введение. Знание свойств двухфазных жидкометаллических течений как в магнитном поле, так и вне его играет важную роль в осуществлении многих технологических процессов, в частности в разработке жидкометаллических МГД генераторов. Наша работа в этой области, по содержанию скорее фундаментальная, чем прикладная, включает: *а)* создание модели и разработку программ для численного расчета характеристик течения в одномерном приближении, и *б)* теоретическое и экспериментальное исследование трехмерных эффектов путем определения локальных параметров течения.

Исследование ограничивалось анализом режимов пузырькового течения. Одномерная модель была разработана для двухкомпонентных жидкометаллических течений в общем виде, а эксперименты проводились на лабораторной натриевой установке. Кроме того, разработанный в ходе исследований датчик сопротивления для локальных измерений в натрии может найти применение и в других областях — например, в охлаждаемом натрием реакторе на быстрых нейтронах.

В данной работе представлены некоторые новейшие результаты, полученные в рамках вышеупомянутой программы. Главной целью первого этапа работ было предсказание влияния воздействия различных начальных условий на характеристики пузырькового потока, в частности на среднее скольжение. Внимание было сосредоточено на влиянии магнитного поля на скольжение, так как роль скольжения в определении суммарного КПД генератора весьма существенна. На втором этапе представлены экспериментальные результаты по локальному распределению пузырьков и влиянию на него магнитного поля для вертикального аргон-натриевого потока.

1. Одномерная модель пузырькового течения. 1.1. Описание модели. Рассмотрим вертикальный восходящий поток жидкого металла, помещенный во внешнее магнитное поле. Пусть течение направлено по оси x , тогда в случае поперечного магнитного поля $\mathbf{B} = B_y \mathbf{e}_y$. Это поле неизменно на участке длиной L и экспоненциально уменьшается вне этой области при характерной длине s . У стенок канала в области по-

* G. Gerbeth, H. Langenbrunner, R. Lotzmann, S. Eckert (Central Institute for Nuclear Research, P.O.Box 19, 8051 Dresden, Germany). Some Results on Liquid-metal MHD Two-phase Flow. Пер. с англ. М. Путнинь под ред. Ю. Вирзвалка.

стоянного магнитного поля и перпендикулярно к нему расположены электроды с высокой электропроводностью. Сечение канала предполагается постоянным. Описание движения множества пузырьков, плывущих в движущемся жидком металле, основывалось на работах [1, 2], в которых использована хорошо известная модель пузырькового течения Ван-Вийнгардена. Наш подход основан на следующих предположениях: 1) течение изотермично благодаря высокой теплоемкости жидкого металла; 2) газовая фаза состоит из пузырьков со средним радиусом $r(x)$, и массоперенос между фазами отсутствует; 3) параметры течения зависят только от координаты x и рассматриваются как усредненные по поперечному сечению (в первом приближении не учитывалось влияние процесса усреднения, что, вообще говоря, возможно путем введения коэффициентов корреляции [3]); 4) течение стационарно; 5) разность давлений газа и окружающей жидкости не учитывается; 6) газ считается идеальным; 7) электрическое поле E_x постоянно в области электродов благодаря их высокой электропроводности. На этих предположениях основывается система уравнений:

непрерывности

$$d[(1 - \alpha)u_{\text{ж}}]/dx = 0, \quad d(\alpha\rho_r u_r)/dx = 0, \quad (1)$$

баланса сил (комбинированного)

$$\begin{aligned} & \alpha\rho_r u_r \frac{du_r}{dx} + (1 - \alpha)\rho_{\text{ж}}u_{\text{ж}} \frac{du_{\text{ж}}}{dx} = \\ & = -dp/dx - [\alpha\rho_{\text{ж}} + (1 - \alpha)\rho_{\text{ж}}] - f_{\text{тр}} - \sigma_{\text{д}}B^2u_{\text{ж}}(1 - K); \end{aligned} \quad (2)$$

движения единичного пузырька

$$d(\rho_r V_{\text{п}} u_r)/dt = -V_{\text{п}}(dp/dx) - \rho_r V_{\text{п}} g - F_c - F_{\text{и}}, \quad (3)$$

где $F_c = 0,5\rho_{\text{ж}}\pi r^2 C_0 (u_r - u_{\text{ж}}) |u_r - u_{\text{ж}}|$ — сила сопротивления, $F_{\text{и}} = 0,5\rho_{\text{ж}}u_r d[V_{\text{п}}(u_r - u_{\text{ж}})]/dx$ — виртуальная сила инерции; сохранения массы и состояния пузырька

$$\rho_r r^3 = \text{const}, \quad p = \text{const} \cdot \rho_r. \quad (4)$$

Здесь α — относительное газосодержание; ρ — плотность; u — скорость; $V_{\text{п}}$ — объем пузырька. Индексами "ж" и "г" обозначены жидкая и газовая фазы соответственно. Система является полной, если определены плотность силы трения $f_{\text{тр}}$, электропроводность двухфазной смеси $\sigma_{\text{д}}$, коэффициент нагрузки $K(x)$ и коэффициент сопротивления C_0 . В работе это сделано с использованием: 1) моделирования силы трения методом Локарта—Мартинелли; 2) соотношения Максвелла для $\sigma_{\text{д}}$; 3) выбора $K_0 = K(x)u_{\text{ж}}(x)/u_{\text{ж}0}$ методом проб и ошибок с целью подбора внешнего тока (который зависит от нагрузочного сопротивления $R_{\text{н}}$), равного току, индуцируемому у электродов (индекс 0 относится к начальному значению на входе в канал); 4) полуэмпирического закона [2], связывающего коэффициент сопротивления C_0 с аналогичным коэффициентом для единичного пузырька C_{00}

$$C_0 = C_{00} (1 - \alpha)^4. \quad (5)$$

Коэффициент сопротивления для единичного пузырька имеет вид [4]

$$C_{00} = C (1 + \sqrt{N}) \quad (6a)$$

в случае поперечного магнитного поля $B = Be_y$, и

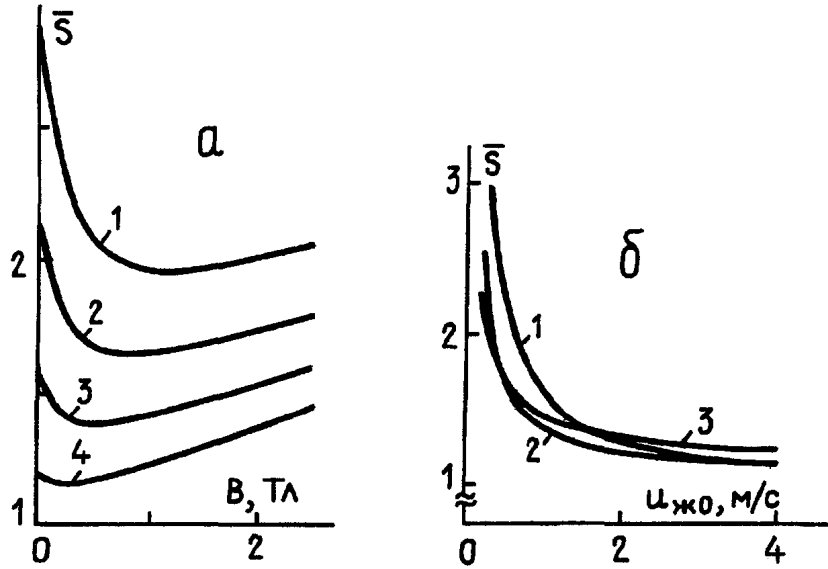


Рис. 1. Зависимости среднего скольжения \bar{S} : а — от индукции поперечного магнитного поля B_y при начальной скорости жидкости $u_{ж0} = 0,3$ (1), 0,5 (2), 1 (3) и 3 м/с (4); б — от $u_{ж0}$ при $B_y = 0$ (1), 0,5 (2) и 1,5 Тл (3).

Fig. 1. Mean slip ratio \bar{S} vs magnetic field B at initial liquid velocity $u_{l0} = 0.3$ (1), 0.5 (2), 1 (3) and 3 m/s (4) (a) and vs u_{l0} at $B_y = 0$ (1), 0.5 (2) and 1.5 T (3) (b).

$$C_{c0} = 0,33\sqrt{N} \quad (66)$$

в случае продольного $B = Be_y$. Здесь C берется из стандартной кривой сопротивления единичного пузырька для соответствующего числа Рейнольдса, а $N = \sigma_{ж} r B^2 / [\rho_{ж} |u_r - u_{ж}|]$ — параметр локального взаимодействия.

1.2. Результаты по среднему скольжению. Рассматривали уравнение для среднего скольжения, определяемого как

$$\bar{S} = \frac{1}{L_r} \int_0^{L_r} [u_r(x)/u_{ж}(x)] dx, \quad L_r = L + 2s. \quad (7)$$

Вычисления проводили для вертикального аргон-натриевого потока со следующими параметрами: прямоугольное поперечное сечение со сторонами $a = 0,1$ см; $L = 0,4$ м; $s = 0,1$ м; $T = 300^\circ\text{C}$; $\alpha_0 = 0,2$; $p_0 = 0,3$ МПа; $u_{ж0} = 1,0$ м/с; $u_{r0} = 1,08$ м/с; $r_0 = 3,0$ мм; $R_x = 0,1$ мОм.

Вышеописанную систему решали численно методом Рунге—Кутты. Получили зависимости \bar{S} от $u_{ж0}$ и B в случае поперечного магнитного поля (см. рис. 1, а и б). Влияние B на среднее скольжение определяется тем, что магнитное поле обладает тормозным эффектом по отношению к $u_{ж}$ (2); увеличивает коэффициент сопротивления пузырьков (ба). Совместное действие этих двух эффектов приводит к результатам, представленным на рис. 1.

Для анализа случая продольного магнитного поля из уравнения (2) исключается слагаемое, описывающее электромагнитную силу. Магнитное поле действует на течение только через коэффициент сопротивления (66), что приводит к монотонному уменьшению \bar{S} с возрастанием B (рис. 2). Таким образом, результаты, представленные на рис. 1 и 2, ясно показывают, что с помощью внешнего магнитного по-

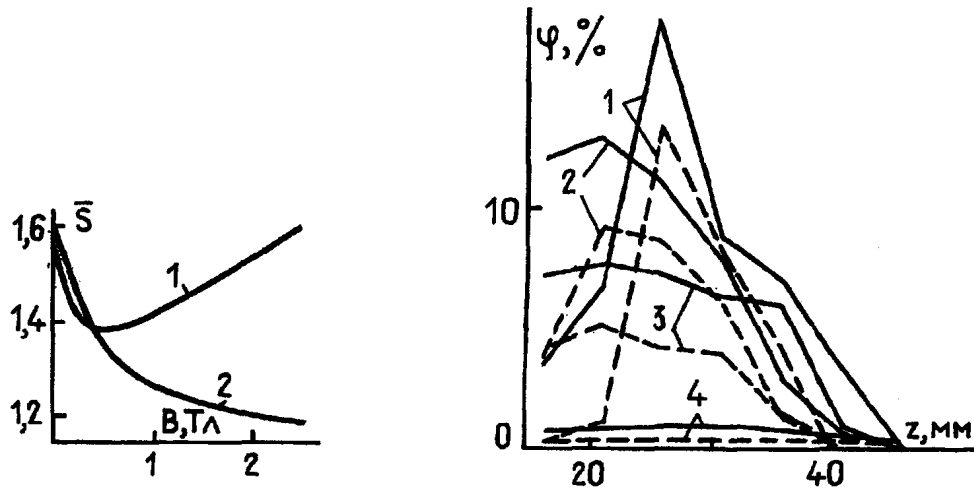


Рис. 2. Зависимости \bar{S} от B при $u_{\text{ж}0} = 1$ м/с в поперечном (1) и продольном (2) магнитном поле.

Fig. 2. Mean slip ratio vs the transversal (1) and longitudinal (2) magnetic field; $u_{\text{ж}0} = 1$ m/s.

Рис. 3. Измеренное локальное относительное газосодержание (распределение в направлении, перпендикулярном магнитному полю) при $B_y = 0,45$ (1), 0,24 (2), 0,12 (3) и 0 Тл (4) и $u_{\text{ж}} = 0,4$ (сплошные) и 0,7 м/с (штриховые линии).

Fig. 3. Measured local void fraction (distribution along the direction perpendicular to the magnetic field) at $B_y = 0.45$ (1), 0.24 (2), 0.12 (3) and 0 T (4) and $u_{\text{ж}} = 0.4$ (solid) and 0.7 m/s (dashed lines).

ля можно существенно повлиять на среднее скольжение. В частности, применение продольного магнитного поля (которое крайне слабо влияет на потерю давления в канале и может быть осуществлено, например, использованием простого соленоида) ведет к значительному уменьшению \bar{S} . Это может быть использовано на практике, например в подъемнике системы OMACON.

2. Локальные измерения относительного газосодержания. В целях изучения локальных свойств двухфазных жидкометаллических МГД течений измеряли локальное распределение пузырьков в вертикальном аргон-натриевом потоке. Для изучения процесса поперечного рассеяния пузырьков в исследуемое сечение через единственный капилляр (диаметром 0,9 мм), находящийся в центре поперечного сечения канала, инжестировали аргон. Инжектор находился в самом начале рабочей области, расположенной между полюсными наконечниками, а датчик — в ее конце. Длина рабочей области была 320 мм, расстояние между инжектором и датчиком — 290 мм. Датчик представлял собой единственный вольфрамовый остекленный провод и давал воспроизводимые результаты в течение нескольких часов. Траверсный механизм позволял перемещать датчик практически по всему поперечному сечению канала, размеры которого были 45×50 мм. Результаты измерений, представленные на рис. 3 и 4, показывают, что магнитное поле обладает фокусирующим эффектом по отношению к локальному распределению пузырьков. В отсутствие магнитного поля по сечению наблюдалось постоянное значение (порядка 1%) относительного газосодержания.

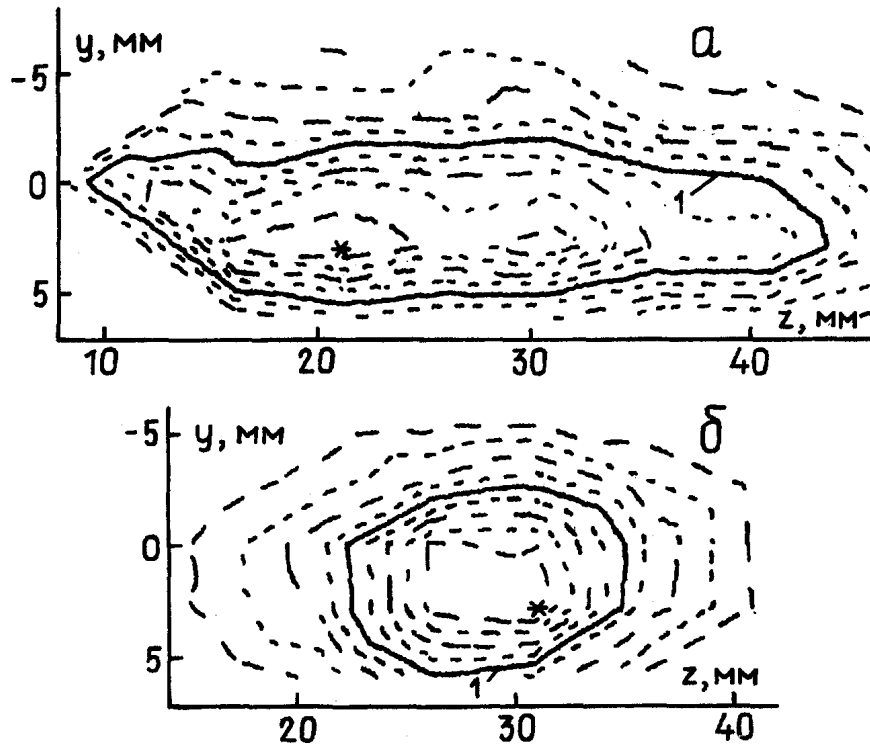


Рис. 4. Изолинии измеренного локального относительного газосодержания для $u_{\text{ж}} = 0,1$ м/с, расхода 80 л/ч при $B_y = 0,24$ (а) и 0,45 Тл (б). Точки максимального газосодержания отмечены звездочками; в них $\varphi = 6,3\%$ (а) и 29,2% (б), а на изолиниях 1 $\varphi = 3,1$ (а) и 14,6% (б).

Fig. 4. Isoplots of the measured local void fraction for $u_l = 0.1$ m/s, flowrate 80 l/h, at $B_y = 0.24$ (a) and 0.45 T (b). The points of maximum void fraction are marked by asterisks; in them, $\varphi = 6.3$ (a) and 29.2% (b) but on the isolines 1 it is $\varphi = 3.1$ (a) and 14.6 (b).

держания. Фокусирующий эффект в направлении, перпендикулярном магнитному полю, для разных скоростей течения натрия приведен на рис. 3. Изолинии на рис. 4,а показывают, что подавление рассеяния пузырьков, параллельное направлению поля (по оси y), выражено сильнее, чем перпендикулярное полю. Различие в воздействии на процесс рассеяния в параллельном и перпендикулярном к полю направлениях уменьшается с ростом интенсивности магнитного поля (рис. 4,б). При этом из-за фокусирующего эффекта магнитного поля сильно возрастает максимальное содержание пузырьков (ср. рис. 4,а и б).

Выводы. В работе представлены некоторые новые результаты, полученные в рамках программы исследования двухфазных жидкометаллических МГД течений. Для обобщенного описания параметров течения создана одномерная модель. С помощью внешнего магнитного поля среднее скольжение может быть значительно изменено. Процесс поперечного рассеяния пузырьков экспериментально изучался на лабораторной натриевой установке. Наблюдался сильный фокусирующий эффект магнитного поля, различный по степени воздействия в направлениях, параллельном и перпендикулярном полю.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kamiyama S.* Analysis of two-phase MHD flow in converging-diverging ducts // *Single- and Multiphase Flows in an Electromagnetic Field* / Eds H. Branover, P. S. Lykoudis and M. Mond. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. — New York: AIAA, 1985. — Vol. 100. — P. 304...316.
2. *Mond M., Sukoriansky S.* An analytical model for bubbly flow // *Single- and Multiphase Flows in an Electromagnetic Field* / Eds H. Branover, P. S. Lykoudis and M. Mond. *Progress in Astronautics and Aeronautics*. — New York: AIAA, 1985. — Vol. 100. — P. 329...339.
3. *Yakhot A., Branover H.* An analytical model of a two-phase liquid metal magnetohydrodynamic generator // *Phys. Fluids*. — 1982. — Vol. 25, No. 3. — P. 446...451.
4. *Гельфгат Ю. М., Лиелаусис О. А., Щербинин Э. В.* Жидкий металл под действием электромагнитных сил. — Рига, 1976. — 248 с.

Поступила в редакцию 19.10.93 (14.12.92)