

Г. Гербет, С. Экерт, Х. Лангенбруннер

**ДИСПЕРСИЯ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ В УСЛОВИЯХ ДВУХМЕРНОЙ
МГД ТУРБУЛЕНТНОСТИ***

G. Gerbeth, S. Eckert, H. Langenbrunner

Research Center Rossendorf (FZR), Germany

**DISPERSION OF GLASS BUBBLES IN A TWO-DIMENSIONAL
MHD TURBULENCE**

The dispersion of small gas bubbles distribution in the cross section of a two-phase MHD flow directed vertically upwards has been investigated. Local void fraction measurements are presented for an argon-sodium flow with and without an external transverse magnetic field. Due to the material parameters of liquid sodium high non-dimensional parameters are reached with a conventional electromagnet of $B \leq 0.45$ T: Hartmann number $Ha \leq 3000$, interaction parameter $N = 100 - 800$ for the Reynolds number $Re = 10^4 - 7 \cdot 10^4$ ($(Ha/Re) \cdot 10^3 = 40 - 300$). These parameters indicate that a well-developed 2D MHD turbulence should exist in the channel flow. The dispersion of an initially narrow void distribution shows this behaviour clearly. The measurements are compared with those of [1] and [2]. However, in these papers a 2D turbulence was not reached (or not possible, respectively), so that the experimental results presented here can be considered as the first measurements showing the influence of 2D turbulence on the transport of small gas bubbles.

Введение. Турбулентные пульсации течения проводящей жидкости подавляются внешним магнитным полем. Полный перепад давления в канале согласуется с теоретическими оценками, полученными для ламинарного режима при отношении Ha/Re , превышающем некоторое критическое значение. Однако непосредственные измерения пульсаций скорости подтверждают существование остаточных возмущений течения [3, 4]. Сохранение в сильном магнитном поле двухмерных вихрей, оси которых параллельны силовым линиям поля, можно объяснить моделью двухмерной МГД турбулентности. Тем не менее, некоторые проблемы, касающиеся подробной структуры течения, и, в частности, тепло- и массопереноса в таких МГД течениях, окончательно еще не решены.

В данной работе представлены экспериментальные результаты изучения течения газожидкостной Na—Ar среды в поперечном магнитном поле, выбранного потому, что, во-первых, физические свойства жидкого натрия позволяют проводить исследования при интересующих нас больших значениях параметра МГД взаимодействия (N), а, во-вторых, разработанный нами метод измерения с использованием резистивных датчиков позволяет экспериментально определять распределение газосодержания в канале.

Результаты эксперимента. С целью изучения локальных свойств двухфазных МГД течений в эксперименте измерялась объемная доля газовой

* Пер. с англ. В. Мирошникова под ред. Ю. Бирзвалка.

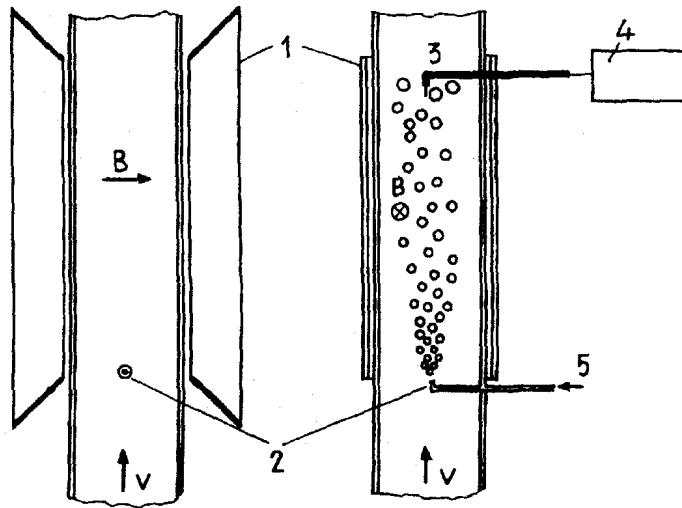


Рис. 1. Схема испытательного участка двухфазного течения. 1 — полюсный наконечник, 2 — инжекция газа, 3 — перемещаемый датчик и 4 — устройство сбора данных.

Fig. 1. Scheme of the two-phase test section. 1 — magnet pole face, 2 — gas injection, 3 — movable sensor, 4 — data acquisition.

фазы в вертикальном аргон-натриевом течении. В состав экспериментальной установки (рис. 1) входит вертикальный канал прямоугольного поперечного сечения $45 \times 50 \text{ мм}^2$, изготовленный из нержавеющей стали. Двухфазная среда течет между полюсными наконечниками длиной 320 мм через область однородного поперечного внешнего магнитного поля с максимальной индукцией 0,45 Тл.

Аргонные пузырьки барботируются через одиночное сопло диаметром 0,9 мм, расположенное в центре поперечного сечения канала напротив нижней кромки полюсных наконечников. Газосодержание измеряется однопроводным датчиком сопротивления на расстоянии 290 мм вниз по течению. Результаты становятся воспроизводимыми через несколько часов. Механический привод позволяет перемещать датчик почти по всему поперечному сечению канала.

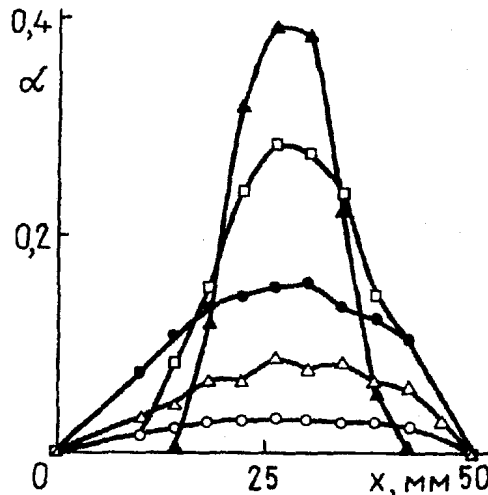


Рис. 2. Распределение локального относительного газосодержания α в направлении, перпендикулярном магнитным силовым линиям при $B = 0$ (○), 0,1 (△), 0,2 (●), 0,3 (□) и 0,45 Тл (▲).

Fig. 2. Local void fraction α perpendicular to the direction of the field lines for various intensities of the magnetic field $B = 0$ (○), 0.1 (△), 0.2 (●), 0.3 (□) and 0.45 T (▲).

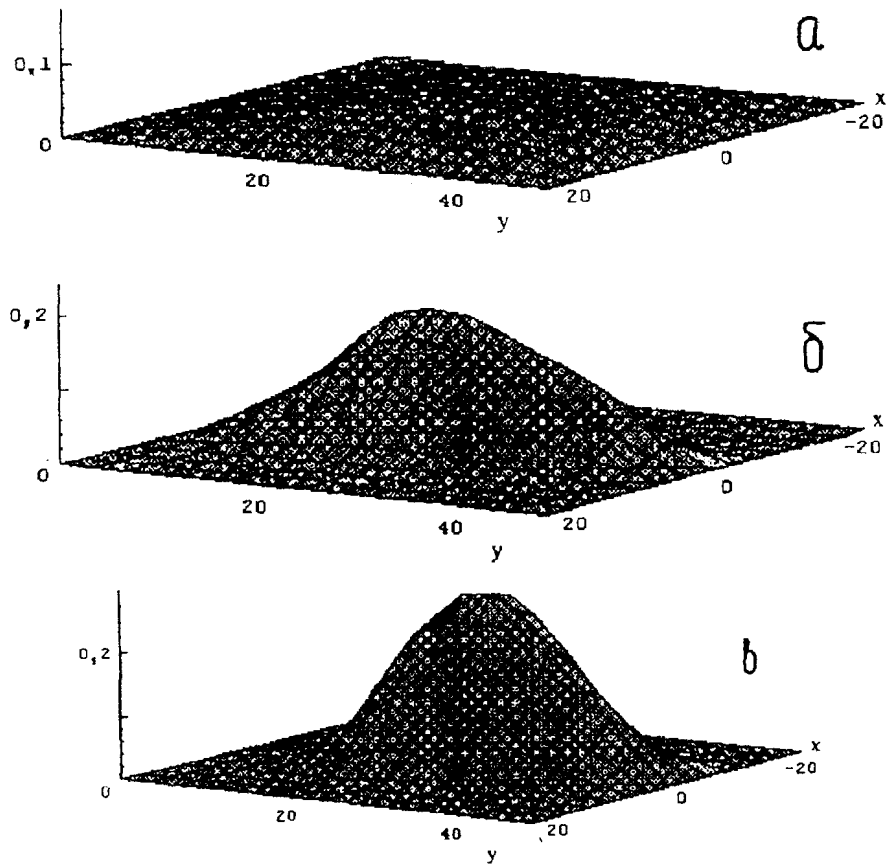


Рис. 3. Профили измеренного относительного газосодержания при $B = 0$ (а), 0,2 (б) и 0,3 Тл (в) по оси x .

Fig. 3. Profiles of the measured local void fraction distribution for the magnetic field $B = 0$ (а), 0.2 (б) and 0.3 T (в) in direction x .

Стабилизирующее влияние внешнего магнитного поля на возмущения скорости с ростом магнитного поля должно приводить к увеличению концентрации газовой фазы в центре канала. Такой эффект фокусировки в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля, представлен на рис. 2 для средней скорости жидкого натрия 0,1 м/с.

Выраженная анизотропия турбулентной дисперсии пузырьков была обнаружена еще в ходе первых измерений локального газосодержания по сечению канала [5]. Дополнительные измерения позволяют подтвердить эти результаты в процессе дальнейших детальных исследований.

Характерные распределения локальной объемной доли газовой фазы для средней скорости жидкого натрия 0,1 м/с приведены на рис. 3а—в. При $B = 0$ Тл газовая фаза распределена практически однородно (рис. 3а), графики на рис. 3б и 3в однозначно показывают, что уменьшение дисперсии распределения пузырьков более выражено в направлении поля, чем в перпендикулярном направлении. Согласно рис. 3 дальнейшее увеличение магнитного поля приводит к уменьшению анизотропии воздействия поля на процесс дисперсии в параллельном и перпендикулярном к силовым линиям направлениях. Более того, максимальная объемная доля газовой

Таблица 1

Характерные значения экспериментальных параметров

Работа	Жидкий металл	Газ	Канал	$Re \times 10^{-4}$	Ha_{\max}	$(Ha/Re)_{\max} \times 10^3$	N_{\max}	$(N \cdot Rm)_{\max}$
[1]	Hg	N	Круглый (\varnothing 38 мм)	6,8—10	900	13	12	0,2
[2]	Hg	Ar	Круглый (\varnothing 23 мм)	7—14	220	3	0,7	0,01
Данная	Na	Ar	Прямоугольный (45 × 50 мм ²)	1—7	2000	200	400	30

фазы на рис. 3в значительно возрастает по сравнению с показанной на рис. 3б из-за суммарного фокусирующего воздействия магнитного поля.

Сильная анизотропия распределения газовой фазы свидетельствует о наличии в течении двухмерных вихрей. Массоперенос аргоновых пузырьков значительно сильнее подавлен в направлении силовых линий магнитного поля, чем в перпендикулярном направлении.

На первый взгляд эти результаты полностью противоречат результатам [1, 2]. В этих работах получена приблизительно равная дисперсия распределения газовых пузырьков как параллельно, так и перпендикулярно магнитному полю, причем в перпендикулярном направлении фокусирующий эффект незначительно сильнее. Однако эти эксперименты проводились в круглых каналах в совершенно другом диапазоне безразмерных параметров (табл. 1). Согласно [6] критическое значение Ha/Re , при котором в поперечном магнитном поле перепад давления начинает соответствовать ламинарному потоку,

$$(Ha/Re)_{cr} = [215 - 85 \exp(-0,35\beta)]^{-1}, \quad \beta = b/a,$$

где a — полуширина поперечного сечения в параллельном полю направлении, b — полуширина поперечного сечения в перпендикулярном направлении.

При $\beta = 1$ критическое значение примерно равно $6,5 \cdot 10^{-3}$. В то время как для нашего потока Na—Ar параметр Ha/Re существенно превышал критический в экспериментах [1, 2], он только достигал критического значения или вообще не достигал его.

Кроме того, круглое поперечное сечение канала не обеспечивало, если оно вообще может обеспечить, необходимые условия для развития двухмерной МГД турбулентности. На этом основании принципиальное различие между данными, полученными в экспериментах [1, 2] и нами, заключается в том, что в нашем эксперименте выполняются условия, необходимые для существования полностью развитой двухмерной МГД турбулентности.

Выводы. В поперечном магнитном поле исследуется массоперенос мелких аргоновых пузырьков, которые барботируются через одиночное сопло в турбулентное течение жидкого натрия.

Основной результат заключается в сильной анизотропии распределения объемной доли газовой фазы по поперечному сечению канала. Влияние магнитного поля в основном приводит к наблюдаемому в эксперименте процессу концентрации распределенной газовой фазы в центре канала.

При этом дисперсия распределения пузырьков в направлении магнитного поля значительно меньше, чем в перпендикулярном направлении.

Анизотропное газораспределение представляет собой характерное для двумерной МГД турбулентности явление.

На следующих этапах исследования намечается провести систематические измерения распределения пузырьков в зависимости от чисел Гартмана, Рейнольдса и параметра МГД взаимодействия N_{\max} и количественно оценить массоперенос через соответствующие коэффициенты дисперсии.

Помимо этого необходимо решить проблемы, связанные с влиянием М-образного профиля скорости и магнитного давления на дисперсию распределения пузырьков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lykoudis P. S.* Liquid Metal Magneto-fluid-mechanic Turbulence. Proceed. of the 4th Beer-Sheva Seminar, Jerusalem, Israel 1984 // AIAA. — 1985. — Vol. 100. — P. 255—279.

2. *Michiyoshi I.* Liquid Metal Two-phase Flow Heat Transfer with and without Magnetic Field // JSME Int. J. — 1989. — Vol. 32 — P. 483—493.

3. *Брановер Г. Г., Слюсарев Н. М., Щербинин Э. В.* Некоторые результаты измерения турбулентных пульсаций скорости в потоке ртути в присутствии поперечного магнитного поля // Магнит. гидродинамика. — 1965. — № 1. — С. 33—36.

4. *Hua H. M., Lykoudis P. S.* Turbulence Measurements in a Magneto-fluid-mechanic Channel // Nuclear Sci. and Engng. — 1974. — Vol. 54. — P. 445.

5. *Гербет Г., Лангенбруннер Х., Лоцманн Р., Экерт С.* Некоторые результаты исследования двухфазных жидкометаллических магнитогидродинамических течений // Магнит. гидродинамика. — 1993. — № 4. — С. 28—33.

6. *Branover H., Gershon P.* Experimental Investigation of the Origin of Residual Disturbances in Turbulent MHD Flows after Laminarization // J. Fluid Mech. — 1979. — Vol. 94. — P. 629—647.

Поступила в редакцию 03.02.95 (06.12.94)