

А.А. Зори, В.Д. Коренев

ИССЛЕДОВАНИЕ ОРТОГОНАЛЬНОСТИ МГД–ИЗМЕРИТЕЛЯ
ПУЛЬСАЦИЙ СКОРОСТИ

В натурных исследованиях турбулентности морей, океанов и русловых потоков успешно применяются магнитогидродинамические (МГД) измерители, определяющие скорость потока (или пульсации скорости потока) по значению разности потенциалов электрического поля, индуцируемого в жидкости, движущейся в магнитном поле МГД-преобразователя скорости. Благодаря высоким эксплуатационным и метрологическим характеристикам перспективны преобразователи с двухполюсной магнитной системой, заключённой в обтекатель в форме тела вращения с эллипсоидальным носовым обводом. Они обладают высокой чувствительностью, достаточной механической прочностью, линейной характеристикой преобразования, не зависящей от свойств жидкости, имеют низкий уровень собственных гидродинамических шумов, могут эксплуатироваться в потоках агрессивных жидкостей [1,2,3].

Формирование сигнала преобразователя осуществляется в окрестности его носового обвода – в поле рассеяния магнитной системы 1, размещённой в корпусе обтекателя 2 (см. рис.). Наличие поперечного зазора 3 магнитной системы обеспечивает “выдув” магнитного поля \bar{B} в рабочую зону преобразователя – примыкающую к носовому обводу область исследуемого течения. Съём потенциалов электрического поля, индуцируемого в потоке исследуемой жидкости, движущейся в магнитном поле преобразователя, осуществляется с помощью электродов E_1 и E_2 , расположенных симметрично в зазоре магнитной системы и торцами выходящих на поверхность электроизоляционного обтекателя в носовой части. В исследуемом потоке преобразователь ориентируется продольной осью OZ вдоль направления вектора скорости осредненного течения, набегающего на носовой обвод.

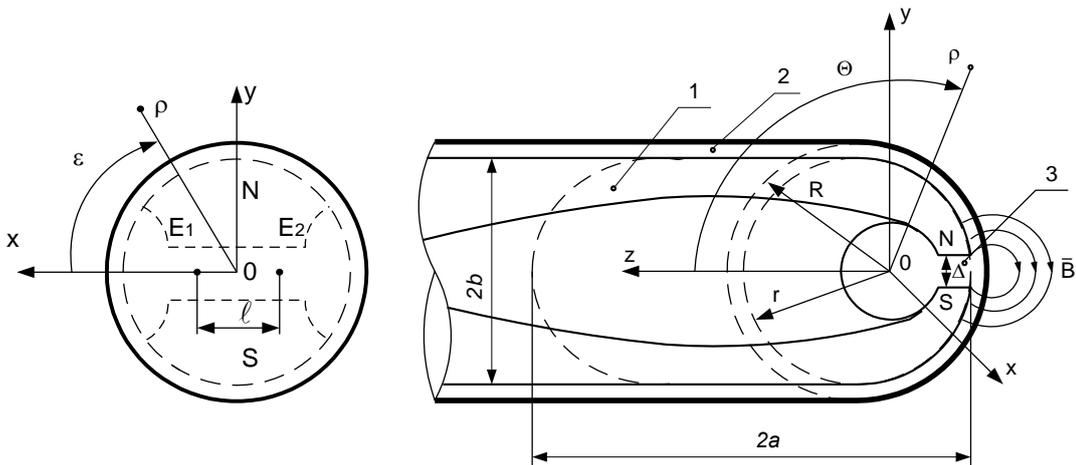


Рисунок – конструкция МГД-преобразователя пульсаций скорости.

Преобразователь разработан для измерения продольной составляющей V'_z вектора пульсаций скорости потока [1,2,3]. Выходной сигнал измерителя при этом определяется разностью потенциалов электродов E_1 и E_2 и пропорционален мгновенному значению измеряемой составляющей вектора пульсаций скорости $V'_z = [\varphi(E_1) - \varphi(E_2)]/S_u$, где S_u – чувствительность измерителя. Возможность независимого измерения продольной составляющей скорости (ортогональность измерителя) обоснована в работах [1,2 и др.]. Приводимые ниже результаты показывают, что описанный выше преобразователь пульсаций скорости (см. рис.) позволяет независимо измерять одновременно две составляющие вектора пульсаций скорости потока – продольную V'_z и поперечную V'_x , лежащие в плоскости симметрии магнитной системы XOZ . При этом значение поперечной составляющей определяется: $V'_x = [\varphi(E_1) + \varphi(E_2)]/S_v$, где S_v – чувствительность измерителя поперечной составляющей.

Исследование ортогональных свойств измерителя поперечной составляющей пульсаций скорости выполнено путём анализа его обобщенной весовой функции \bar{W} (w_1, w_2, w_3), характеризующей вклад элементарных объёмов $d\Omega$ исследуемого потока \bar{V} (v_1, v_2, v_3) в выходной сигнал измерителя:

$$U = \int \int \int_{\Omega} \bar{V} \cdot \bar{W} d\Omega .$$

Известно [3], что при постоянной проводимости жидкости σ распределение электрического потенциала φ в рабочей области МГД-преобразователя, обтекаемого потоком электропроводящей жидкости, может быть получено из решения второй краевой задачи для уравнения Пуассона

$$\Delta\varphi = \bar{\mathbf{V}} \cdot \text{rot}\bar{\mathbf{V}} \quad (1)$$

при естественных граничных условиях:

а) $\left. \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right|_{\Gamma} = 0$ – вытекает из отсутствия нормальной составляющей электрического

тока на непроводящей поверхности преобразователя;

б) $\left. \frac{\partial\varphi}{\partial n} \right|_{\rho \rightarrow \infty} \rightarrow 0$ – в силу отсутствия магнитного поля на достаточно большом

удалении от преобразователя ($\rho \rightarrow \infty$).

При решении (1) распределение вектора магнитной индукции $\bar{\mathbf{B}}(x,y,z)$ в рабочей области преобразователя задавалось системой уравнений

$$\begin{cases} \Delta\varphi_m = 0, \\ \bar{\mathbf{B}} = -\mu \cdot \nabla\varphi_m, \end{cases} \quad (2)$$

при следующих граничных условиях :

$$\text{а) } \left. \frac{\partial\varphi_m}{\partial n} \right|_{\Gamma} = -\frac{I}{\mu} \cdot B_n \Big|_{\Gamma}, \quad \text{б) } \left. \frac{\partial\varphi_m}{\partial n} \right|_{\rho \rightarrow \infty} \rightarrow 0,$$

которые вытекают, с одной стороны, из условия непрерывности нормальной составляющей магнитной индукции B_n на полюсах магнитной системы преобразователя, а с другой – из отсутствия магнитного поля на достаточно

большом удалении от преобразователя ($\rho \rightarrow \infty$). В уравнениях (1) и (2) : n – внешняя нормаль к поверхности Γ преобразователя; φ_m – магнитный потенциал; μ – магнитная проницаемость жидкости.

Точное решение задачи (1) для МГД-преобразователя пульсаций скорости затруднительно по следующим причинам:

– во-первых, для турбулентного потока распределение мгновенных значений скорости, входящее в правую часть (1), в настоящее время в аналитическом виде не определено. Поэтому выполнена теоретическая оценка характеристик измерителя в приближении осредненного потока. Полученные результаты справедливы так же для крупномасштабной части спектра пульсаций скорости, где масштабы гидродинамических неоднородностей превосходят размеры области формирования сигнала измерителя: флуктуации скорости здесь эквивалентны изменениям во времени осредненного потока;

– во-вторых, трудность получения точного решения (1) обусловлена так же сложной конфигурацией внешних обводов преобразователя и распределения индукции \bar{B} магнитного поля в его рабочей области. Поэтому при исследовании ортогональных свойств измерителя использована упрощённая модель преобразователя, представляющая собой сферу радиуса R , вписанную в его носовой обвод (см. рис.). Распределение скорости в рабочей области преобразователя при этом принято соответствующим известному для обтекаемой сферы. Принятая модель с точки зрения метрологических свойств эквивалентна преобразователю, рабочая область которого расположена до миделевого сечения вписанной сферы – здесь носовой обвод преобразователя близок к сферическому и распределение скорости существенно не отличается от распределения вблизи носовой части обтекаемой сферы [1,2]. Магнитное поле в рабочей области преобразователя при решении (1) аппроксимировано полем двухполюсной сферической магнитной системы радиуса r (см. рис.), вписываемой во внешние обводы носовой части магнитной системы преобразователя. Правомочность такого подхода обусловлена тем, что электрическое поле в рабочей области преобразователя формирует в основном магнитный поток, создаваемый магнитной системой в окрестности её

поперечного зазора; поток же, рассеивающийся с части магнитной системы, расположенной за миделевым сечением вписанной сферы, значительно слабее, рабочей области преобразователя практически не достигает и не вносит вклад в формирование его сигнала.

Согласно [4] решение краевой задачи для уравнения (1) с учётом приведённых граничных условий можно представить в виде:

$$\varphi(p, p_0) = \int_{\Omega} \int \int [\bar{\mathbf{V}} \times \bar{\mathbf{B}}] \cdot \nabla G(p, p_0) d\Omega. \quad (3)$$

Здесь: Ω – объём движущейся жидкости; p, p_0 – точки области Ω с координатами (x, y, z) и (x_0, y_0, z_0) , соответственно; $G(p, p_0)$ – функция Грина соответствующей краевой задачи.

При измерении поперечной составляющей скорости (или пульсаций скорости) потока выходной сигнал измерителя, равный сумме потенциалов его электродов $E_1(R, \theta_E, 0)$ и $E_2(R, \theta_E, \pi)$, может быть записан:

$$U = \varphi(E_1) + \varphi(E_2) = \int_{\Omega} \int \int [\bar{\mathbf{V}} \times \bar{\mathbf{B}}] \cdot \nabla \Phi(E_1, E_2) d\Omega = \int_{\Omega} \int \int [V_x \cdot w_1(E_1, E_2) + V_y \cdot w_2(E_1, E_2) + V_z \cdot w_3(E_1, E_2)] d\Omega = \int_{\Omega} \int \int \bar{\mathbf{V}} \cdot \bar{\mathbf{W}}(E_1, E_2) d\Omega, \quad (4)$$

где w_1, w_2, w_3 – составляющие весовой функции $\bar{\mathbf{W}}(E_1, E_2)$ измерителя:

$$w_1(E_1, E_2) = B_y \cdot Q_3 - B_z \cdot Q_2, \quad w_2(E_1, E_2) = B_z \cdot Q_1 - B_x \cdot Q_3, \quad w_3(E_1, E_2) = B_x \cdot Q_2 - B_y \cdot Q_1;$$

$$Q_1 = \frac{\partial}{\partial x} \Phi(E_1, E_2), \quad Q_2 = \frac{\partial}{\partial y} \Phi(E_1, E_2), \quad Q_3 = \frac{\partial}{\partial z} \Phi(E_1, E_2);$$

$$\Phi(E_1, E_2) = G(p, E_1) + G(p, E_2).$$

Для сферической модели преобразователя согласно [4] записана функция Грина рассматриваемой краевой задачи и определены аналитические выражения для функционалов $\Phi(E_1, E_2)$, Q_1 , Q_2 и Q_3 , как функции конструктивных параметров

преобразователя [5,6]. Анализ выражений для Q_i ($i=1,2,3$) показывает, что функционалы Q_1, Q_2, Q_3 в соответствующих точках I ÷ IV квадрантов плоскости XOY на рис. связаны между собой следующим образом:

$$\begin{aligned} Q_1(I) &= -Q_1(II) = -Q_1(III) = Q_1(IV); \\ Q_2(I) &= Q_2(II) = -Q_2(III) = -Q_2(IV); \\ Q_3(I) &= Q_3(II) = Q_3(III) = Q_3(IV). \end{aligned} \quad (5)$$

Компоненты B_x, B_y и B_z вектора \bar{B} в рабочей области преобразователя, исходя из антисимметрии $B_x(x,y,z)$ и симметрии $B_y(x,y,z)$ относительно осей OX и OY и антисимметрии и симметрии $B_z(x,y,z)$ относительно осей OX и OY, связаны между собой в соответствующих точках I÷IV квадрантов следующим образом:

$$\begin{aligned} B_x(I) &= -B_x(II) = B_x(III) = -B_x(IV); \\ B_y(I) &= B_y(II) = B_y(III) = B_y(IV); \\ B_z(I) &= B_z(II) = -B_z(III) = -B_z(IV). \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, согласно (4) с учётом (5) и (6) связь между значениями составляющих вектора обобщенной весовой функции w_i ($i=1,2,3$) в соответствующих точках I ÷ IV квадрантов имеет вид:

$$\begin{aligned} w_1(I) &= w_1(II) = w_1(III) = w_1(IV); \\ w_2(I) &= -w_2(II) = w_2(III) = w_2(IV); \\ w_3(I) &= -w_3(II) = -w_3(III) = w_3(IV). \end{aligned} \quad (7)$$

В случае обтекания преобразователя потоком электропроводящей жидкости решение (4) с учётом соотношений (7) имеет вид:

$$U = V_x \cdot \iiint_{\Omega} \frac{R^3}{2\rho^5} \left[(3x^2 - \rho^2 - \frac{2\rho^5}{R^3}) \cdot w_1 + 3xyw_2 + 3xzw_3 \right] d\Omega = V_x \cdot S_u, \quad (8)$$

где S_u - чувствительность измерителя поперечной составляющей.

Таким образом, из (8) следует, что рассматриваемый МГД-преобразователь в режиме суммирования потенциалов электродов обеспечивает измерение поперечной составляющей V_x вектора скорости (или пульсаций скорости) потока жидкости, коллинеарной базе его электродов $\overline{E_1 E_2}$.

Как известно [1,2], рассматриваемый МГД-преобразователь при вычитании потенциалов электродов E_1 и E_2 обеспечивает измерение продольной составляющей V'_z вектора пульсаций скорости потока и его выходной сигнал :

$$\begin{aligned} U^- &= \varphi(E_1) - \varphi(E_2) = \iiint_{\Omega} \overline{V'}(V'_x, V'_y, V'_z) \cdot \overline{W}^-(W_1^-, W_2^-, W_3^-) d\Omega = \\ &= V'_z \cdot \iiint_{\Omega} \frac{R^3}{2\rho^5} \left[3xzW_1^- + 3yzW_2^- + (3z^2 - \rho^2 - \frac{2\rho^5}{R^3}) \cdot W_3^- \right] d\Omega = V'_z \cdot S_u, \quad (9) \end{aligned}$$

где W_1^-, W_2^-, W_3^- – составляющие обобщённой весовой функции \overline{W}^- измерителя продольной составляющей.

На основании (8) и (9) можно утверждать, что рассматриваемый МГД-преобразователь обеспечивает одновременное и независимое измерение двух составляющих вектора пульсаций скорости потока жидкости: продольной V'_z и поперечной V'_x , коллинеарной базе его измерительных электродов. Полученные результаты справедливы для масштабов гидродинамических неоднородностей, превосходящих соответствующие размеры области формирования сигналов измерителя. Последние могут быть определены на основе анализа конфигурации и пространственной протяженности соответствующей обобщенной весовой функции.

1. Повх И.Л., Дунаевский И.Г., Корнев В.Д., Чеплюков В.Г. Метрологические характеристики кондукционных измерительных преобразователей // Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности: Тез. докл. II Всесоюзн. Совец.-Новосибирск, 1976.–С.102-104.

2. Большаков В.Б., Дунаевский И.Г. Диаграмма направленности квазисферических МГД-преобразователей гидродинамических полей // Теоретическая и прикладная механика.-Киев-Донецк, 1983.-Вып.14–С.128-135.

3. Шерклиф Дж. Теория электромагнитного измерения расхода.–М.: Мир, 1965.

4. Положий Г.Н. Уравнения математической физики.–М.: Высшая школа, 1964.

5. Большаков В.Б., Дунаевский И.Г., Корнев В.Д. Исследование гидродинамических характеристик электромагнитных преобразователей скорости морских течений // Проблемы гидромеханики в освоении океана.–Киев, 1984.–ч. I.: Гидро-термодинамика стратифицированных течений и пограничный слой: материалы III-й республиканской конференции по прикладной гидромеханике.–С.84-85.

6. Большаков В.Б., Дунаевский И.Г., Корнев В.Д. Исследование зависимости чувствительности магнитогидродинамического измерителя пульсаций скорости от числа Рейнольдса // Магнитная гидродинамика.–1988.– №4.— С.-115-120.

Донецкий государственный технический университет

E-mail: kaf-et@kita.dgtu.donetsk.ua