

Г. И. ПОПОВ

ИНДУКЦИОННЫЙ МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

В работе предлагается метод регистрации вертикальной скорости поверхности воды, основанный на явлении электромагнитной индукции. Предложена конструкция системы, с помощью которой в аэрогидроканале сделаны записи вертикальной скорости поверхности воды. Сделаны оценки ошибок, связанных с предложенным способом регистрации скорости и проведена тарировка системы.

Предлагаемый в работе метод регистрации вертикальной скорости поверхности воды основан на явлении электромагнитной индукции. Связь между изменением потока магнитной индукции Φ , пронизывающего некоторый контур, и наведенной в последнем электродвижущей силой ε дается законом Фарадея

$$\varepsilon = \frac{-d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

При колебании магнита внутри катушки индуктивности по закону $\eta(t)$ на выходе катушки будет регистрироваться величина, пропорциональная $d\eta/dt$. Если, например, $\eta(t) = a \cos \omega t$, то через катушку, включенную в замкнутую электрическую цепь, пройдет ток:

$$I = \frac{\Phi_0}{R} a \omega \sin \omega t, \quad (2)$$

где Φ_0 — коэффициент, зависящий от поля магнита и геометрии катушки, R — активное сопротивление цепи, ω — частота колебаний магнита около положения равновесия, a — амплитуда колебаний магнита.

Расчет показывает, что коэффициент Φ_0 не будет зависеть от времени, и сдвиг фаз между колебаниями магнита и током в выходной цепи равен точно $\pi/2$, если геометрические размеры магнита удовлетворяют соотношениям:

$$2r/s \ll 1 \quad (r — радиус магнита, S — его длина), \quad (3)$$

$$a \ll l \quad (l — длина катушки), \quad (4)$$

$$L\omega/R \ll 1 \quad (L — индуктивность катушки). \quad (5)$$

Исходя из приведенных условий была разработана и испытана система, схематическое изображение которой приводится на рис. 1. Здесь 1 — катушка индуктивности, 2 — магнит, 3 — держатель, в кото-

ром закреплена ось рычага, 4 — рычаг, 5 — пенопластовый поплавок и 6 — координатник.

Магнитом служила намагниченная стальная вязальная спица. Ее геометрические размеры хорошо соответствовали условию (3), т. е. $2r/s \sim 0,01 \ll 1$.

Рычаг, во-первых, препятствует сносу поплавка поверхностным течением и ветром, а во-вторых, передает магниту колебания поплавка, следующего за вертикальными перемещениями поверхности воды. Чтобы выполнялось условие (4), поплавок и магнит соединялись через рычаг так, что перемещения магнита составляли 0,08 величины перемещений поплавка. В нашем опыте максимальное отношение a/l составило $3/40$. Максимальное отношение $L\omega/R \sim 0,04$, т. е. в опыте условия (4) и (5) выполнялись хорошо.

Назначение поплавка — передавать вертикальные движения поверхности воды магниту. При спокойной поверхности воды на поплавок действуют сила веса и архимедова, уравновешивающие друг друга.

При ветре и волнении на поверхности воды на поплавок по вертикали будут дополнительно действовать две силы: аэродинамическое давление воздуха и дополнительная архимедова сила, связанная с тем, что вследствие своей инерционности поплавок не мгновенно и неточно следует за профилем волны. Как показывают экспериментальные измерения, сила аэродинамического давления примерно в 20 раз меньше дополнительной архимедовой силы, которую вследствие этого можно считать единственной вынуждающей силой, вызывающей вертикальные перемещения поплавка. Связанная с отклонениями поверхности воды от невозмущенного уровня, дополнительная архимедова сила изменяется синхронно волнению на поверхности воды.

Если воспользоваться результатами работы В. В. Шулейкина¹ о вертикальных колебаниях корабля под действием волнения, то можно оценить ошибки в регистрации амплитуды волны и различие в фазах колебаний поверхности воды и поплавка. Выражения для амплитуды вынужденных колебаний b и сдвига фаз φ между колебаниями поверхности воды и колебаниями системы имеют вид

$$b = \frac{b_0}{\left[\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right)^2 + \frac{4\beta^2\omega^2}{\omega_0^4} \right]^{1/2}}, \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{-2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}, \quad (7)$$

где ω — частота вынуждающей силы, ω_0 — частота собственных колебаний, β — коэффициент сопротивления среды, b_0 — амплитуда вынуждающих колебаний.

¹ См. В. В. Шулейкин. Физика моря. М., Изд-во АН СССР, 1941.

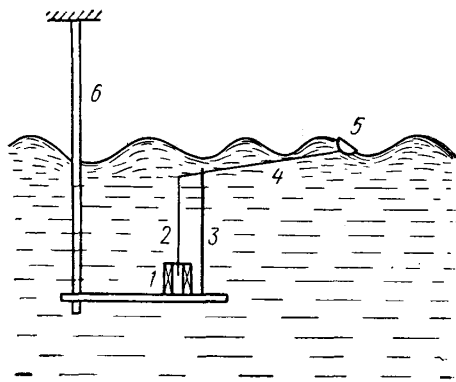


Рис. 1

Оценим b и φ для условий конкретного эксперимента. В аэрогидроканале Гидрофизической лаборатории МГУ проводились записи вертикальной скорости поверхности воды в трех точках по разгону (т. е. на трех расстояниях от входа воздушного потока в аэрогидроканал). На рис. 2 представлен образец полученных записей. По таким записям рассчитывались спектры и находились частоты, соответствующие максимуму. Значения их в последовательно возрастающих точках разгона составили 20,8; 15,3 и 13,2 рад/сек. Частота собственных колебаний системы поплавок — магнит (ω_0) равна 41,6 рад/сек. Величина β определяется соотношением

$$\beta = \frac{\lambda}{T}, \quad (8)$$

где $\lambda = \ln \frac{b_1}{b_2}$ — логарифмический декремент затухания,

$$T = \frac{2\pi}{(\omega_0^2 - \beta^2)^{\frac{1}{2}}}$$

Логарифмический декремент затухания находился экспериментально. Для этого записывались на осциллографную ленту собственные колебания системы при невозмущенной поверхности воды. Натуральный логарифм отношения начальной амплитуды b_1 к последующей b_2 дает λ . По той же записи находится и период собственных колебаний.

В таблице приведены рассчитанные по формулам (6) и (7) сдвиг фаз φ и отношение b/b_0 .

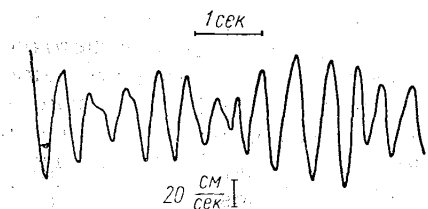


Рис. 2

Разгон, м	φ , град	b/b_0
5,8	11,7	1,25
10,5	7,5	1,07
13,5	6,3	1,01

Как видим, наибольшая погрешность получается при больших частотах волнения. Ошибки в амплитуде достигают по разгону 25, 7 и 1% соответственно, сдвиги фаз невелики.

Вспомним, что сам метод регистрации дает свою ошибку в величине амплитуды, поскольку отношение a/l не бесконечно мало. При малом разгоне волны имеют небольшие амплитуды, так что ошибка метода при их регистрации не превышает 1%. Далее ошибка растет, поскольку возрастают амплитуды волн. Окончательно ошибки регистрации амплитуды при максимальных отклонениях возмущенной поверхности составляют при разгонах 5,8; 10,5 и 13,5 м соответственно 26, 12 и 8%.

Для расшифровки записей, полученных индукционным методом, проводилась тарировка по амплитуде. Делалась она так. Конец рычага, к которому прикреплялся поплавок, совершал колебания с разной амплитудой и разной частотой. Предположим, что эти колебания совершаются по гармоническому закону

$$\eta = a \cos \omega t. \quad (9)$$

Тогда вертикальная скорость выражается так:

$$\frac{d\eta}{dt} = -a \frac{2\pi}{T} \sin \omega t. \quad (10)$$

На записи, очевидно, получается тоже гармоническое колебание с амплитудой, пропорциональной амплитуде $d\eta/dt$. Величину a в выражении (9) можно задать, поставив ограничители, а период колебаний (T) определить по времени (t), которое требуется для десяти колебаний, происходящих с одинаковой частотой, $T = t/10$.

Тогда, зная a и T , можно найти по формуле (10) амплитуду скорости. На осциллографной ленте, очевидно, следует брать то же амплитудное значение. Давая a различные значения и совершая при фиксированных амплитудах колебания с различными T , можно получить некоторую зависимость отклонений на осциллографной ленте от $d\eta/dt$ (рис. 3). Как можно заметить, эта зависимость оказалась линейной. На рис. 3 крестики, кружочки, точки соответствуют различным значениям a ($a_{\max} = 4 \text{ см}$).

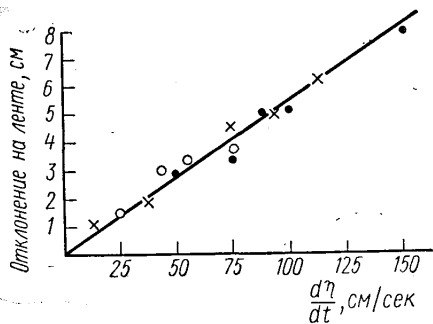


Рис. 3

Конечно, такой способ тарировки не свободен от недостатков. Во-первых, колебания совершаются не точно по гармоническому закону и не всегда равномерно. Но для этого и берется период T как среднее из десяти колебаний. Во-вторых, амплитуды колебаний на осциллографной ленте вследствие неравномерности движения конца рычага получаются неодинаковыми, поэтому их тоже приходится осреднять.

Сравнение метода записи вертикальной скорости поверхности воды с показаниями струнного волнографа при одновременной регистрации волн, создаваемых волнопродуктором, показало хорошее согласие (в пределах 2%).

Область применения индукционного метода записи вертикальной скорости поверхности воды ограничена. Во-первых, высоты регистрируемых волн не должны быть большими (в наших опытах они были не более 15 см). Во-вторых, без существенного искажения регистрируется волнение, частота которого не превышает 3 *гц*. Поэтому предложенная конструкция наиболее эффективна в условиях аэрогидроканала.

Поступила в редакцию
25.I 1971 г.

Кафедра
физики моря и вод суши