

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ СКОРОСТИ ВОДЫ В ОТКРЫТОМ ВОДОТОКЕ

© 2019 К. А. Пресняков, Г. К. Керимкулова, Г. О. Аскалиева, Е. Ю. Першакова

*Институт машиноведения и автоматики НАН КР (г. Бишкек, Киргизия)*

*Предложен метод измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке, основанный на использовании уравнений баланса энергии и баланса сил, позволяющих подтвердить физическую основу предлагаемого метода и получить удовлетворительные значения измеряемого параметра.*

*Ключевые слова: метод, баланс энергии, баланс сил, поверхностная скорость воды.*

### Введение

Известен «Способ измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке» [1], заключающийся в наблюдении за движением поплавка, сопряженного посредством блока и троса с грузом-противовесом, вдоль рейки, проградуированной в единицах поверхностной скорости воды.

Недостаток известного метода заключается в проведении дополнительных работ по градуировке рейки в единицах поверхностной скорости воды, а также в использовании дополнительных механических приспособлений (шлюпка, якорь, рейка).

**Задача исследований** – повышение надежности предлагаемого метода за счет физически обоснованного его

функционирования.

**Решение поставленной задачи.** Задача исследования решается таким образом, что в методе измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке [2], заключающемся в наблюдении за движением поплавка, сопряженного посредством блока и троса с грузом-противовесом, – вдоль рейки, проградуированной в единицах поверхностной скорости воды, – в котором наблюдают за движением поплавка, от момента его строгания до момента достижения грузом-противовесом уровня горизонтального осевого поперечного сечения валика вращения, а поверхностную скорость воды вычисляют по формуле

$$u_m = \sqrt{\frac{g \cdot (\rho_{zn} - \rho_v) \cdot V_{zn} \cdot (H - h_{zn})}{\pi \cdot [\rho_v \cdot R_n^2 \cdot H + \rho_{вал} \cdot \{(r_{вал} - r_{вн})^2 \cdot l_{вал} + 2 \cdot r_{вал}^2 \cdot \Delta l_T\}]}}}, \quad (1)$$

где  $\rho_v$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $V_{zn}$  – объем груза-противовеса, м<sup>3</sup>;  $h_{zn}$  – высота груза-противовеса, м;  $u_m$  – поверхностная скорость воды, м/с;  $R_n$  – радиус сферического поплавка, м;  $H$  – глубина наполнения водотока, м;  $\rho_{zn}$  – плотность материала груза-противовеса, кг/м<sup>3</sup>;  $r_{вал}$  – радиус вращающегося валика, м;  $\rho_{вал}$  – плотность материала вращающегося валика, кг/м<sup>3</sup>;  $l_{вал}$  – длина вращающегося валика, м;  $(r_{вал} - r_{вн})$  –

толщина цилиндрической стенки валика вращения, м;  $\Delta l_T$  – толщина торсовых стенок валика вращения, м.

Подобное исполнение метода измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке, по сравнению с прототипом позволяет повысить надежность измерений поверхностной скорости воды.

Обоснование предлагаемого метода измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке производят следующим образом (рис.).

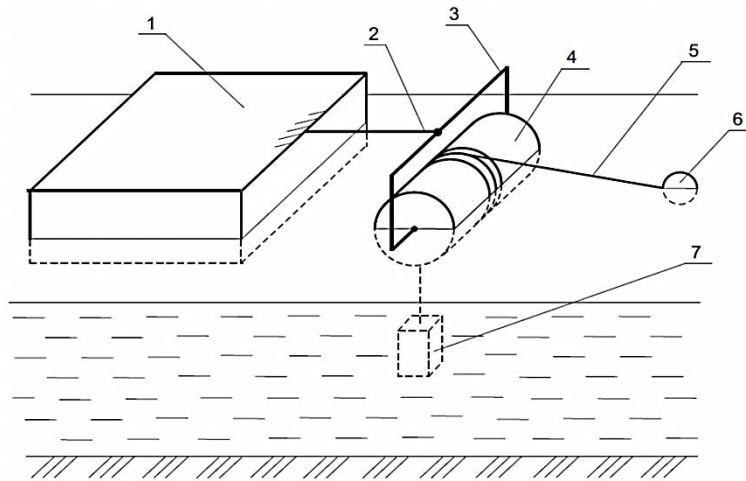


Рисунок. Схема реализации метода измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке: 1 - плавучее средство, 2 – штанга, 3 – рамка, 4 – валик, 5 – нить, 6 – сферический поплавок, 7 – груз-противовес.

Изменение потенциальной энергии груза-противовеса равно сумме кинетических энергий поступательного движения поплавка и вращательного движения валика [3]

$$E_n + E_{вал} = \Pi_{эн}, \quad (2)$$

где  $E_n$  – кинетическая энергия поступательного движения поплавка, Дж;  $E_{вал}$  – кинетическая энергия валика вращения, Дж;  $\Pi_{эн}$  – изменение потенциальной энергии груза-противовеса, Дж.

Из рассмотрения схемы реализации метода (см. рис.) следует уравнение баланса энергии:

➤ кинетическая энергия поступательного движения поплавка [4] запишется в виде

$$E_n = \rho_v \cdot u_m^2 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot H, \quad (3)$$

где  $\rho_v$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $u_m$  – поверхностная скорость воды, м/с;  $R_n$  – ра-

$$m_{вал} = \rho_{вал} \cdot V_{вал} = \rho_{вал} \cdot \left\{ \pi \cdot (r_{вал} - r_{вн})^2 \cdot l_{вал} + 2\pi \cdot r_{вал}^2 \cdot \Delta l_T \right\}, \quad (6)$$

где  $\rho_{вал}$  – плотность материала вращающегося валика, кг/м<sup>3</sup>;  $V_{вал}$  – объем вращающегося валика, м<sup>3</sup>;  $(r_{вал} - r_{вн})$  – толщина цилиндрической стенки валика вращения,

$$E_{вал} = \rho_{вал} \cdot \left\{ \pi \cdot (r_{вал} - r_{вн})^2 \cdot l_{вал} + 2\pi \cdot r_{вал}^2 \cdot \Delta l_T \right\} \cdot r_{вал}^2 \cdot \omega_{вал}^2; \quad (7)$$

➤ угловая скорость вращения валика равна

$$\omega_{вал} = u_m / r_{вал}. \quad (8)$$

диус сферического поплавка, м;  $H$  – глубина наполнения водотока, м;

➤ кинетическую энергию вращающегося валика [3] представим в виде

$$E_{вал} = M_{вал} \cdot \omega_{вал}^2, \quad (4)$$

где  $M_{вал}$  – момент инерции вращающегося валика, кг·м<sup>2</sup>;  $\omega_{вал}$  – угловая скорость вращения валика, 1/сек;

➤ момент инерции вращающегося валика [3] (тонкостенный цилиндр замкнутого объема) равен

$$M_{вал} = m_{вал} \cdot r_{вал}^2, \quad (5)$$

где  $m_{вал}$  – масса вращающегося валика, кг;

$r_{вал}$  – радиус вращающегося валика, м;

➤ массу вращающегося валика запишем в виде

м;  $l_{вал}$  – длина вращающегося валика, м;

$\Delta l_T$  – толщина торсовых стенок валика вращения, м;

➤ кинетическая энергия вращающегося валика

Получим кинетическую энергию вращающегося валика

$$E_{вал} = \rho_{вал} \cdot \pi \cdot \left\{ (r_{вал} - r_{вн})^2 \cdot l_{вал} + 2 \cdot r_{вал}^2 \cdot \Delta l_T \right\} \cdot r_{вал}^2 \cdot \left( u_M^2 / r_{вал}^2 \right) = \\ = \rho_{вал} \cdot \pi \cdot \left\{ (r_{вал} - r_{вн})^2 \cdot l_{вал} + 2 r_{вал}^2 \cdot \Delta l_T \right\} \cdot u_M^2. \quad (9)$$

Изменение потенциальной энергии груза-противовеса равно

$$P_{эн} = g \cdot (\rho_{эн} - \rho_в) \cdot V_{эн} \cdot (H - h_{эн}), \quad (10)$$

где  $\rho_{пл}$  – плотность материала груза-противовеса, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободно-

го падения, м/с<sup>2</sup>;  $V_{эн}$  – объем груза-противовеса, м<sup>3</sup>;  $h_{эн}$  – высота груза-противовеса, м.

Таким образом, уравнение баланса энергии (2) переписывается в виде

$$\rho_в \cdot u_M^2 \cdot \pi \cdot R_n^2 \cdot H + \rho_{вал} \cdot \pi \cdot \left\{ (r_{вал} - r_{вн})^2 \cdot l_{вал} + 2 \cdot r_{вал}^2 \cdot \Delta l_T \right\} \cdot u_M^2 = \\ = g \cdot (\rho_{эн} - \rho_в) \cdot V_{эн} \cdot (H - h_{эн}). \quad (11)$$

Выразим из (11)  $u_M^2$ , получим:

$$u_M^2 = \frac{g \cdot (\rho_{эн} - \rho_в) \cdot V_{эн} \cdot (H - h_{эн})}{\pi \cdot \left[ \rho_в \cdot R_n^2 \cdot H + \rho_{вал} \cdot \left\{ (r_{вал} - r_{вн})^2 \cdot l_{вал} + 2 \cdot r_{вал}^2 \cdot \Delta l_T \right\} \right]}. \quad (12)$$

Отсюда

$$u_M = \sqrt{\frac{g \cdot (\rho_{эн} - \rho_в) \cdot V_{эн} \cdot (H - h_{эн})}{\pi \cdot \left[ \rho_в \cdot R_n^2 \cdot H + \rho_{вал} \cdot \left\{ (r_{вал} - r_{вн})^2 \cdot l_{вал} + 2 \cdot r_{вал}^2 \cdot \Delta l_T \right\} \right]}}. \quad (13)$$

Проверим соблюдение принципа размерностей в формуле (13).

$$[u_M] = \left[ \sqrt{\frac{числ.}{знам.}} \right] = \sqrt{\frac{[числ.]}{[знам.]}}; \quad (14)$$

[числ.] =  $L \cdot T^{-2} \cdot M \cdot L^{-3} \cdot L^3 \cdot L = L^2 \cdot T^{-2} \cdot M$   
или единица измерения равна Дж;

[знам.]<sub>1</sub> =  $M \cdot L^{-3} \cdot L^2 \cdot L = M$ ; [знам.]<sub>2</sub> =  
 $M \cdot L^{-3} \cdot (L^2 \cdot L + L^2 \cdot L) = M$ .

$$\text{Размерность} \left[ \sqrt{\frac{числ.}{знам.}} \right] = \sqrt{\frac{[числ.]}{[знам.]}} = \sqrt{\frac{L^2 \cdot T^{-2} \cdot M}{M}} = \sqrt{L^2 \cdot T^{-2}} = L \cdot T^{-1}$$

или единица измерения правой части – м/с, что соответствует размерности  $u_M$ .

$$[P_{эн}] = [\rho] \cdot [u_M^2] \cdot [R_n^2] = M \cdot L^{-3} \cdot L^2 \cdot T^{-2} \cdot L^2 = M \cdot L \cdot T^{-2}$$

Следовательно, принцип размерности в формуле (13) соблюдается.

или единица измерения равна кг м/с<sup>2</sup> или Н.

Прежде чем переходить непосредственно к измерениям, необходимо провести оценку веса груза-противовеса. Для этого вовсе необязательно обращаться к уравнению баланса энергии (2), достаточно использовать уравнение равновесия действующих сил

Следовательно, в формуле (15) соблюден принцип размерности.

$$P_{эн} = \rho \cdot u_M^2 \cdot \pi \cdot R_n^2. \quad (15)$$

Это уравнение соответствует положению поплавка в ПМТ (правая мертвая точка – соответствует такому расположению поплавка, когда верхняя граница груза-противовеса находится на уровне горизонтального осевого поперечного сечения валика вращения).

Техническую схему реализации метода измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке осуществляют следующим образом (см. рис).

Проверим соблюдение принципа размерностей в формуле (15).

Плавучее средство 1 размещают на поверхности воды таким образом, чтобы соблюсти условия сопряжения его с бортом водотока: во-первых, обеспечивая перемещение плавучего средства 1 вдоль вертикали согласно изменениям глубины наполнения водотока водой, т.е. подъем плавучего средства 1 при увлечении глубины наполнения, опускание его при уменьшении указанной глубины; во-вторых, для исключения возможного дрейфа плавучего средства 1 в продольном и поперечном направлениях. С плавучим средством 1 жестко связы-

вают штангу 2, на свободном конце которой жестко размещают рамку 3 поперек направления потока воды, таким образом, чтобы канавка (не указана) в центральной части валика вращения 4, которая обеспечивает жесткий контакт нити 5 с валиком вращения 4, совпала со стрежнем потока воды. Нить 5 связывает посредством валика вращения 4 сферический поплавок 6 с грузом-противовесом 7. Материалы тонкостенного цилиндрического валика вращения 4 замкнутого объема и сферического поплавка 6 подбирают таким образом, чтобы плотность валика вращения 4 и плотность сферического поплавка 6 были близки к плотности воды, обеспечивая тем самым полупогруженное (в поверхностный слой воды) состояние валика вращения 4 и сферического поплавка 6.

Нить 5 выполняют в полупругом-полужестком варианте, что позволяет осуществить жесткий контакт нити 5 с канавкой в теле валика вращения 4 и осуществить плавное вхождение в измерительный режим подвижных элементов технической схемы реализации и плавный выход из него указанных элементов.

Метод измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке реализуют следующим образом:

➤ плавучее средство 1 согласно фактической глубине наполнения водотока водой размещают на поверхности потока воды;

➤ штанга 2 (жестко связанная с плавучим средством 1) обеспечивает, благодаря жесткой связи ее с рамкой 3, погружение указанной рамки в поток воды таким образом, что валик вращения 4 находится полу-

$$\frac{R_n}{H} = \frac{r_{вал}}{H} = 0,05 \text{ и } \frac{h_{zn}}{H} = 0,05; \frac{r_{вн}}{H} = 0,04; \frac{l_{вал}}{H} = 0,1; \frac{\Delta l_T}{H} = \frac{r_{вал} - r_{вн}}{H};$$

При условии, что глубина наполнения водотока  $H=1\text{м}$ , указанные величины примут вид:

$$R_n = r_{вал} = 0,05\text{м};$$

$$r_{вн} = 0,04\text{м}, \quad l_{вал} = 0,1\text{м};$$

$$\Delta l_T = r_{вал} - r_{вн} = 0,01\text{м}.$$

$$u_m = \sqrt{\frac{P_{zn} \cdot (H - h_{zn})}{\pi \cdot [\rho_w \cdot R_n^2 \cdot H + \rho_{вал} \cdot \{(r_{вал} - r_{вн})^2 \cdot l_{вал} + 2 \cdot r_{вал}^2 \cdot \Delta l_T\}]}]} = 1,53\text{м/с}.$$

Погрешность измерения поверхностной скорости воды

$$\delta u_m = \frac{1,59 - 1,53}{1,59} \cdot 100\% = 4\%,$$

погруженном состоянии в поверхностном слое потока воды;

➤ для начала измерительного режима необходимо, при отпуске сферического поплавка 6 поток воды, придать поплавку некоторый начальный импульс для преодоления ЛМТ (ЛМТ – левая мертвая точка соответствует нахождению поплавка 6 близи боковой поверхности валика вращения 4 и нахождению груза-противовеса 7 на дне водотока);

➤ сферический поплавок 6, связанный с валиком вращения 4 посредством нити 5, испытывает влияние динамического напора набегающего потока воды, под действием которого сферический поплавок 6 перемещается в продольном направлении, увлекая при этом посредством нити 5 во вращательное движение валик вращения 4, который, в свою очередь, способствует поднятию груза-противовеса 7.

Достижение грузом-противовесом 7 уровня горизонтального осевого поперечного сечения (не указано) валика вращения 4 свидетельствует о завершении измерительного режима технической схемы реализации метода измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке.

Для количественной оценки используем пример водотока с единичными гидравлическими условиями [4]:  $Q = 1 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\bar{u} = 1 \text{ м/с}$ ,  $H = 1 \text{ м}$ ,  $V = 1 \text{ м}$ ,  $u_m = 1,59 \text{ м/с}$ . Кроме того, необходимо задать геометрические характеристики подвижных элементов технической схемы реализации метода измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке:

Кроме того необходимо учесть, что оценку веса груза-противовеса мы провели по формуле (15). Тогда расчетная формула поверхностной скорости воды примет вид

что подтверждает надежность и достоверность, получаемые с помощью метода измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке (обычно допустимые погрешности измерения скорости воды  $\pm 5\%$ ).

Экономическая эффективность предлагаемого способа измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке обусловлена физически обоснованной его реализацией, что способствует повышению надежности указанного способа.

#### **Заключение**

Предложен метод измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке, основанный на использовании уравнений баланса энергии и баланса сил, позволяющих подтвердить физическую основу предлагаемого метода и получить удовлетворительные значения измеряемого параметра.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1 Устройства для определения скорости и направления течения в поверхностном слое потоков. Авторское свидетельство на изобретение СССР № 25742, 1932 г.

2 Заявка на выдачу патента КР вх. № 3528 от 12.06.2019 г. Способ измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке / Пресняков К. А., Керимкулова Г. К., Аскалиева Г. О., Першакова Е. Ю.

3 Савельев, И. В. Курс общей физики, Т.1. Механика, колебания и волны, молекулярная физика. – М.: Изд. «Наука», 1970, 517 с.

4 Пресняков, К. А. Устройство для измерения поверхностной скорости воды / К. А. Пресняков, Г. К. Керимкулова // Извест. КГТУ им. И. Раззакова. – 2018. – № (46). – С. 290-296.

#### **BASIC PROVISIONS OF THE METHOD OF MEASURING SURFACE WATER VELOCITY IN AN OPEN WATERCOURSE**

© 2019 K. A. Presnyakov, G. K. Kerimkulova, G. O. Askalieva, E. Yu. Pershakova

*Institute of Mechanical Engineering and Automatics, National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Bishkek*

*A method is proposed for measuring the surface velocity of water in open watercourses, based on the use of the energy balance and force balance equations, which allow to confirm the physical basis of the proposed method and obtain satisfactory values of the measured parameter.*

*Keywords: method, energy balance, balance of forces, superficial water velocity.*

Пресняков Константин Александрович – Институт машиноведения и автоматике НАН КР, д. т. н., зав. лабораторией.

Керимкулова Гулсаат Кубатбековна – Институт машиноведения и автоматике НАН КР, к. ф.-м. н., зав. лабораторией, gulsaat@mail.ru.

Аскалиева Гулзада Орозобаевна – Институт машиноведения и автоматике НАН КР, к. т. н., 87guzuza@mail.ru.

Першакова Елена Юрьевна – Институт машиноведения и автоматике НАН КР, ведущий инженер, hellper64@mail.ru.