

УДК 551.46.085

Вознюк Ю. С.

(НЦМОС ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, julijav1904@gmail.com)

ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ ВОДНЫХ ПОТОКОВ. ГИДРОМЕТРИЧЕСКАЯ ВЕРТУШКА

Гидрометрическая вертушка является наиболее распространенным прибором для измерения скоростей течения водных потоков. В работе дан обзор и выполнена систематизация видов гидрометрических вертушек, кратко изложена история их изобретения и основные тенденции развития, проведён сравнительный анализ принципов формирования выходного сигнала.

Ключевые слова: гидрология, гидрометрическая вертушка, лопастной винт, электрический сигнал, крыльчатка, чашечное устройство, скорость течения, формирование выходного сигнала, оптимизация размера и формы ротора.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Для определения скоростей течения воды известно достаточно много методов и приборов. Среди них наиболее распространенным считается метод, основанный на использовании гидрометрической вертушки, а также несколько менее распространенных методов: с использованием поплавков или батометров.

В гидрологии исторически регистрацию скоростей течения осуществляли с помощью вращения ротора — лопастного винта. Этот метод и лег в основу создания и развития гидрометрических вертушек — самых простых и надежных устройств, которые вот уже более двух сотен лет являются основными приборами для определения скорости течения и измерения расхода воды.

Государственная система учета расхода вод в России и в других странах основана на полученных с использованием вертушек результатах измерений скорости течения воды. Непрерывное развитие и повсеместное распространение гидрометрических вертушек привело к вытеснению других методов измерений.

Использование гидрометрических вертушек позволило собрать систематические сведения о режиме водных потоков [1].

Идея использования изменения скорости потока в зависимости от числа оборотов ротора впервые отражена в трудах Леонардо да Винчи (XV век). Он применил

этот принцип при создании прибора для измерения скорости ветра. Первый вращающийся (роторный) измеритель скорости сконструировал Роберт Гук (Англия, XVII век). В России для измерения скорости судов применялся вертушечный лаг М. В. Ломоносова (XVIII век) [2].

Создателем гидрометрической вертушки считают немецкого гидротехника Рейнгарда Вольтмана (1767–1837 гг.), который впервые в 1790 г. применил такой прибор для определения скорости течения реки Эльбы [3].

Вертушка Р. Вольтмана (рис. 1) конструктивно представляла собой крыльчатку, состоящую из четырех пластин, наклоненных относительно плоскости вращения и закрепленных на горизонтальной оси вертушки спицами. Закрепленная в открытом корпусе ось вертушки имела червячную передачу и, вращаясь, передвигала шестеренку, которая устанавливалась на шарнирной раме. «Включение» прибора осуществлялось поднятием рамы при помощи троса, вследствие чего происходило сцепление шестерни с осью прибора. На окружность шестерни были нанесены деления, причем каждый зубец соответствовал одному полному обороту лопастного винта вокруг оси. На раме устанавливался указатель, по которому число оборотов определялось как разность начального и конечного отсчетов, показания которых

снимались с шестерни. До середины XX века регистрация времени измерения осуществлялась при помощи секундомера. А механический принцип, предложенный Р. Вольтманом, нашел применение в ряде других устройств (например, вертушка Экмана — Мерца (рис. 2), измеритель речных струй Лелявского, вертушка морская модернизированная ВМ-М).

Вскоре механический принцип регистрации числа оборотов лопастного винта был заменен на электрическую сигнализацию, замыкающую электрическую цепь через определенное количество оборотов.

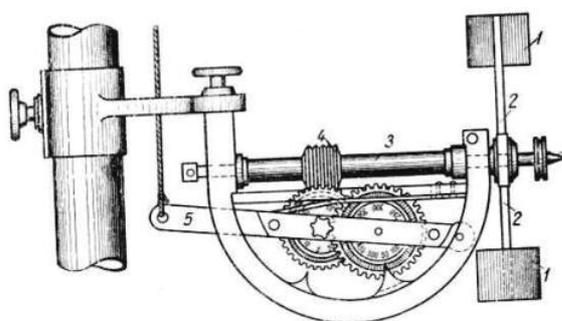


Рисунок 1 Механический счетчик Рейнгарда Вольмана

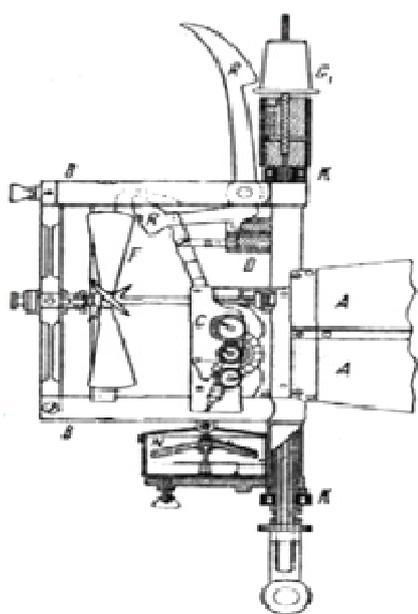


Рисунок 2 Механическая вертушка Экмана — Мерца

Эволюцию гидрометрической вертушки можно сформулировать по **направлениям модернизации и оптимизации её отдельных составных частей**:

1. Модернизация формы и размера ротора (крыльчатки, чашечного устройства, или лопастного винта). Сюда же относится оптимизация компонентного эффекта, инерционности и чувствительности.
2. Оптимизация размеров, формы прибора и стабилизатора направления.
3. Совершенствование принципов формирования выходного сигнала.
4. Разработка и оптимизация счетно-регистрирующего устройства.
5. Разработка и оптимизация другого вспомогательного оборудования.

Таким образом, **целью** данной работы является изучение и систематизация существующих приборов для измерения скорости течения водных потоков.

Объект исследования — гидрометрические вертушки.

Предмет исследования — принципы формирования выходного сигнала гидрометрических вертушек.

Изложение материала. Остановимся подробнее на каждом из этапов процесса **оптимизации размера и формы ротора**:

1. Использование крыльчатки (лопастей, наклоненных под разным углом относительно оси вращения). К устройствам с таким типом ротора относят, например, вертушку Р. Вольмана, вертушки САНИИРИ, вертушку Экмана — Мерца, и вертушку морскую модернизированную ВМ-М. В настоящее время от использования роторов такого типа полностью отказались. Хотя крыльчатка нашла применение в чашечном устройстве робинзонова креста [4].

2. Использование чашечного устройства. Эти вертушки действуют по принципу робинзонова креста, который употребляется в качестве анемометра для измерения скорости ветра, и основан на том, что движущаяся масса (воздух, вода) оказывает на вогнутые поверхности давление большее, чем на выпуклые. Чашки, имеющие форму полуша-

рий, конусов или параболоидов, числом 4 или 6, расположены вершинами по окружности одна за другой и скреплены между собою рамкой с осью вращения в центре.

Верхний конец оси проходит в контактную камеру. Камера размещена над верхним концом оси и имеет винтовую нарезку для присоединения к зубчатому колесу, а выше расположен эксцентрик.

Чашечные вертушки с вертикальной осью являются главным и основным типом приборов Геологической службы США (USGS — United States Geological Survey). Прототипом чашечных вертушек, используемых в USGS, является «вертушка Прайса» (1885 г.) с вертикальной осью вращения, червячной передачей, закрепленной в подпятниках (рис. 3) [4].

В СССР вертушки Прайса (с электрической сигнализацией) начали производить в 1927 г. (вертушки марки ИВХ) [5].

Незначительные отличия имела применяемая в США в конце XIX в. вертушка системы Эллиса. Она имела четыре конические чашечки, окруженные цилиндрической клеткой.

Сегодня используются вертушки с креплением чашечного ротора как к горизонтальной оси корпуса (USGS TYPE AA-MH MODEL 6215 (рис. 3), USGS TYPE AA MODEL 6200 (рис. 4)), так и к вертикальной. Вертикальная ось корпуса наиболее удобна при необходимости погружения вертушки в лунки при работах со льда (USGS TYPE AA-ICE MODEL 6240 USGS TYPE AA-ICE-P MODEL 6245 (рис.5)) [5].



Рисунок 3 Вертушка Прайса USGS TYPE AA-MH MODEL 6215 (Rickly Hydrological Company, США)

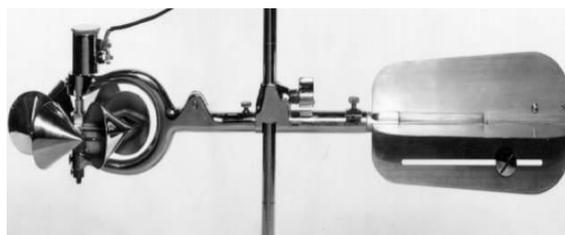


Рисунок 4 Вертушка Прайса USGS TYPE AA MODEL 6200 (Rickly Hydrological Company, США)



Рисунок 5 Вертушка Прайса USGS TYPE AA-ICE MODEL 6240, USGS TYPE AA-ICE-P MODEL 6245

По сравнению с лопастными винтами, чашечное устройство сохраняет компонентные свойства при любой косине струй. Но чашечные приборы фиксируют только максимальную скорость. Не имея защитного кольца, чашечный механизм оказывается слишком хрупким.

Чашечный тип ротора широко используется в США, ряде стран Латинской Америки и Юго-Восточной Азии.

3. Использование лопастного винта. Вертушки с лопастным ротором конструктивно представляют собой обтекаемое те-

ло параболической формы с винтовой поверхностью.

Первый прибор для измерения скорости с лопастным винтом (ротором) был разработан в 1875 г. в Математико-механическом институте Альберта Отта (г. Кемптен, Германия).

В этом же году были разработаны первые европейские стандарты на гидрометрические вертушки, которые во многом определили основные направления развития этих приборов. Все современные модели вертушек с лопастными винтами изготавливались на основе моделей вертушки А. Отта (рис. 6, 7) [6].

В конце XIX в. наряду с лопастными вертушками были распространены приборы (рис. 8), которые по принципу действия были аналогичны вертушкам А. Отта:

- вертушки Ганзера (Чехия, Словакия, Венгрия, Австрия);
- вертушки Ришара (Франция);
- вертушки Гаскеля и Хоффа (США) — трехлопастные вертушки с винтом из резины;
- вертушки Амслера (Швейцария);
- вертушки Альбрехта (Германия, г. Мюнхен).

Первые аналоги вертушек А. Отта в России [7]:

- вертушка А. И. Крылова «Волга» (1918 г., принцип формирования выходного сигнала этой вертушки позднее применялся во всех моделях 20-оборотных вертушек);
- вертушка Грицука (1927 г., контакт осуществлялся с помощью шарика ртути);
- вертушка В. И. Владычанского — Н. Е. Жестовского.

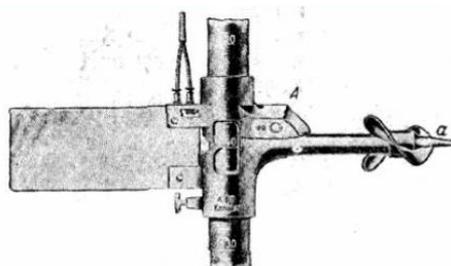


Рисунок 6 Вертушка Отта-IV

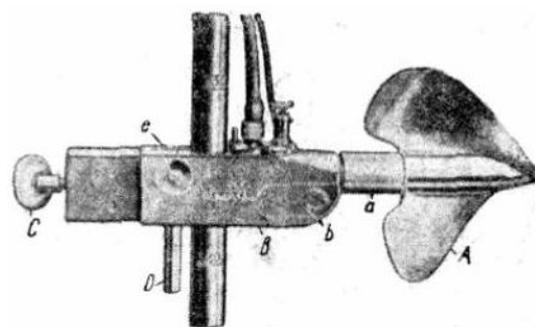


Рисунок 7 Вертушка Отта-V

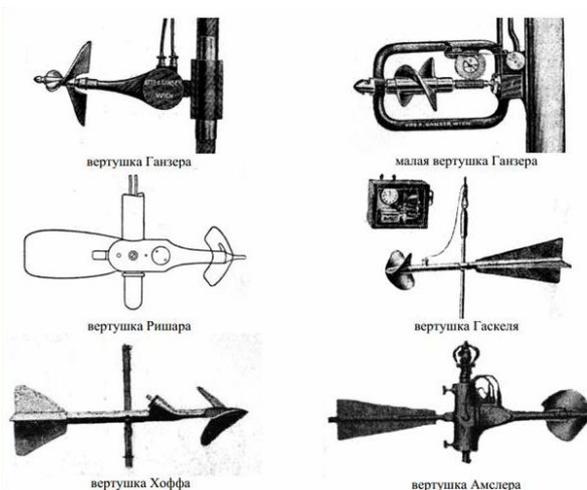


Рисунок 8 Вертушки конца XIX в.

По способу расположения ротора вертушки на оси прибора принято выделять:

- консольные (ось неподвижна) вертушки;
- осевые (ось вращается) вертушки;

По способу расположения оси:

- с вертикальной осью;
- с горизонтальной осью.

Можно выделить три принципа формирования выходного сигнала гидрометрических вертушек: электрический, электролитический и электромагнитный.

Остановимся подробнее на каждом из них.

1. Электрический принцип. Вращение лопастного винта передается посредством червячной передачи на шестерню с электрическим контактом (при этом ось может быть подвижной с червячной передачей либо неподвижной с червячной передачей в корпусе лопастного винта).

Контакт дает замыкание на массу через определенное число оборотов шестерни. В вертушках данного типа (ГР-21М, ГР-55, вертушки Прайса USGS TYPE AA MODEL 6200, 6210, 6215, 6240, 6245, Отта-V и др.) частота поступающих сигналов пропорциональна числу оборотов лопастного винта и количеству зубьев шестерни между замыканиями контакта.

Отечественные вертушки дают замыкание через 20 оборотов, вертушка Отта V — через 25 оборотов, вертушки Прайса — через 5 оборотов или через 2 оборота. К преимуществам данного принципа формирования сигнала относится безотказность контактного устройства (устройство изолировано от воды и намерзающего льда). Но прибор фиксирует скорость, осредненную за период, равный нескольким оборотам, что является недостатком.

По конструкционным особенностям существуют приборы с масляной (ГР-21М) и воздушной (вертушки Прайса) контактными камерами.

Различают приборы, в которых контакт осуществляется:

- через металлический (серебряный) штифт, скользящий по окружности эбонитового колеса с контактной впайкой;
- через металлический штифт, соприкасающийся с контактами, расположенными на плоскости колеса перпендикулярно ему;
- через контактные впайки в плоскостях трущихся друг о друга дисков.

2. Электролитический принцип. Для формирования электрического сигнала, по которому определяется скорость водного потока, используется электропроводность воды.

Под воздействием водного потока лопастной винт вращается вблизи электрода, изменяя его электрическое сопротивление. При этом образуются электрические импульсы, частота которых пропорциональна измеряемой скорости водного потока. Таким образом фиксируется каждый оборот лопастного винта.

Вертушки данного типа могут иметь либо неподвижную ось (например, как в микро-

компьютерном расходомере-скоростемере МКРС, измерителе скорости потока ИСП-1, ИСП-1М (рис. 9), ИСП-2 или ИСТ), либо ось, вращающуюся в агатовых подпятниках (например, как в гидрометрической микровертушке ГМЦМ-1 (рис. 10) или ГР-96).



- 1 — вертушка, 2 — сменный лопастной винт,
- 3 — шток для удлинения стабилизатора,
- 4 — преобразователь сигналов вертушки,
- 5 — указатель направления, 6 — винтлюг,
- 7 — карабины, 8 — стабилизатор

Рисунок 9 Общий вид измерителя скорости потока ИСП-1М



Рисунок 10 Гидрометрическая микровертушка ГМЦМ-1

Основное преимущество данного принципа формирования сигнала — его высокая чувствительность (способность фиксировать скорости с более высоким разрешением, по сравнению с 20-оборотными приборами с шестеренно-червячным устройством).

Главным недостатком этих приборов является непригодность к работе в сложных условиях. Например, при образовании слоя льда на электродах прибор перестает работать [8].

Нормальная работа прибора нарушается и в условиях повышенной минерализации воды или при попадании песка на электроды.

Однооборотные вертушки дали толчок к разработке счетчиков числа оборотов лопастного винта. В настоящее время в России применяется преобразователь сигналов вертушки ПСВ разработки ФГУП «Гидрометприбор». Многие преобразователи могут совмещать в себе не только функции счетчика сигналов, но и секундомера. Такие преобразователи предоставляют информацию о количестве оборотов винта за секунду. На современных устройствах возможность введения параметров тарифовочной зависимости количества оборотов вертушки в секунду от скорости потока позволяет выводить на цифровое табло непосредственно скорость течения.

3. Электромагнитный принцип. Постоянный магнит вращается вместе с лопастным винтом, замыкая на каждом обороте магнитоуправляемый контакт (геркон). При этом создается электрический импульс. Последовательность этих импульсов прямо пропорциональна скорости вращения винта и, соответственно, скорости течения.

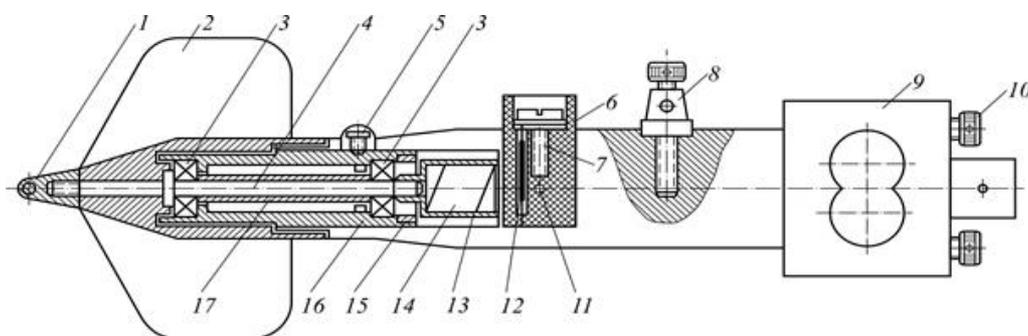
Данный принцип аналогичен электролитическому. Вертушки данного типа могут быть как с вращающейся осью (например, ГР-99 (рис. 11)), так и с неподвижной.

Выводы и направление дальнейших исследований. Обобщенный и изложенный в работе материал позволяет сделать следующие выводы:

1. Основным типом современных гидрологических вертушек являются вертушки с лопастным винтом. Вертушки с чашечным устройством встречаются редко, в основном в США.

2. Размеры лопастного винта минимизированы до 15–30 мм. Это является серьезным достижением в гидромеханике и в практике гидрометрического приборостроения. Минимизация размеров винта позволила применять современные вертушки даже в лабораторных условиях.

3. Современные вертушки оснащены несколькими сменными лопастными винтами, предназначенными для измерения различных диапазонов скоростей.



1 — гайка, 2 — трехлопастной винт, 3 — радиальные шарикоподшипники, 4 — ось, 5 — винт для крепления ходовой части к корпусу, 6 — изоляционная втулка, 7 — изолированная клемма, 8 — массовая клемма, 9 — втулка для крепления вертушки на штанге или вертлюге, 10 — зажимной винт, 11 — винт крепления изоляционной втулки, 12 — магнитоуправляемый контакт, 13 — обойма, 14 — постоянный магнит, 15 — гайка, 16 — гильза, 17 — распорная втулка

Рисунок 11 Общий вид вертушки ГР-99 (в разрезе)

4. В настоящее время для повышения чувствительности гидрометрических вертушек используются передовые материалы при изготовлении ротора (карбид вольфрама, ударопрочная пластмасса, анодированный алюминий). Эти материалы обладают коррозионной стойкостью и высокой механической износоустойчивостью.

5. Минимальная регистрируемая начальная скорость современных вертушек от 0,025 м/с, а максимальная не превышает 10 м/с.

6. У разных моделей современных вертушек предельные относительные погрешности измерения скорости течения варьируются от 10 до 1 %.

7. Наиболее прогрессивными по принципу формирования выходного сигнала

являются вертушки с магнитоуправляемым контактом (герконом). Геркон менее всего чувствителен к негативным факторам внешней среды и позволяет фиксировать мгновенные скорости.

8. Большинство современных вертушек оснащены автоматическими регистрирующими устройствами.

Гидромеханика как наука в современных условиях стремительно развивается. Поэтому учёным и практикам гидрометрического приборостроения предстоит решение ещё многих задач, связанных с усовершенствованием приборов определения скорости течения воды и с устранением недостатков, существующих в настоящее время.

Библиографический список

1. *Практическая гидрометрия [Текст] / И. М. Шаталов [и др.]*. — Минск : БНТУ, 2020. — 104 с.
2. *Быков, В. Д. Гидрометрия [Текст] / В. Д. Быков, А. В. Васильев*. — Л. : Гидрометеиздат, 1977. — 448 с.
3. *Железняков, Г. В. Теория гидрометрии [Текст] / Г. В. Железняков*. — 2-е изд., перераб. — Л. : Гидрометеиздат, 1976. — 344 с.
4. *Карасев, И. Ф. Гидрометрия [Текст] / И. Ф. Карасев, И. Г. Шумков*. — Л. : Гидрометеиздат, 1985. — 384 с.
5. *Справочник по гидрометеорологическим приборам и установкам [Текст] / А. Б. Рейфер, М. И. Алексеев, П. Н. Бурцев и др.* — 2-е изд. — Л. : Гидрометеиздат, 1976. — 430 с.
6. *Быков, В. Д. Гидрометрия [Текст] / В. Д. Быков, А. В. Васильев*. — 2-е изд., перераб. и доп. — Л. : Гидрометеиздат, 1965. — 499 с.
7. *Гириллович, Н. А. Гидрометрия [Текст] : учеб. для вузов / Н. А. Гириллович*. — Л. ; М. : ОНТИ. Глав. ред. стрит. лит-ры, 1937 (Ленинград: тип. им. Евг. Соколовой). — 328 с.
8. *Железняков, Г. В. Исследование работы гидрометрических приборов [Текст] / Г. В. Железняков ; Акад. наук СССР. Секция по науч. разработке проблем водного хозяйства*. — М. : Изд-во АН СССР, 1952. — 239 с.

© Вознюк Ю. С.

*Рекомендована к печати директором ООО «Инвертор» Заведия В. С.,
и.о. зав. каф. АУТП ДонГТИ Ткачёвым Р. Ю.*

Статья поступила в редакцию 09.03.2023.

Voznyuk Yu. S. (SCEM DonSTI, Alchevsk, LPR, julijav1904@gmail.com)

INSTRUMENTS FOR MEASURING THE SPEED OF WATER FLOW. HYDROMETRIC CURRENT METER (PROPELLER)

The hydrometric current meter (propeller) is the most common instrument for measuring the speed of water flow. The paper provides an overview and systematization of the types of hydrometric current meters, briefly outlines the history of their invention and the main development trends, and a comparative analysis has been done on the principles of generating the output signal.

Key words: hydrology, hydrometric current meter, propeller, electric signal, impeller, cup device, flow speed, output signal generation, rotor size and shape optimization.