МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра водно–технических изысканий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему **Разработка макета прибора для измерения скоростей потока в малых водотоках**

Исполнитель **Малахов Александр Юрьевич**
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель канд. геогр. наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)
канд. геогр. наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)
Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«___»_____20__г.

Санкт–Петербург
2026

1. СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ 2

ВВЕДЕНИЕ 4

1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА 6

1.1 Методы, основанные на метках течения в виде поплавков или вносимых в поток веществ 6

1.2 Методы использующие термогидрометры 8

1.3 Ультразвуковые методы измерения скорости потока 10

1.4 Электромагнитные методы измерения скорости потока 10

1.5 Методы, использующие гидродинамические приборы. 12

2. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА 14

2.1. Поплавки 14

2.2. Термогидрометры 16

2.3. Ультразвуковые приборы 17

2.4. Электромагнитные приборы 21

2.5. Гидродинамические приборы 22

2.5.1 Гидрометрические вертушки 22

2.5.2 Трубки Пито 24

3. МАКЕТ ПРИБОРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ПОТОКА В МАЛЫХ ВОДОТОКАХ 27

3.1 Пузырьки воздуха в водной среде 28

3.2 Проект макета прибора 34

3.3 Лабораторные и полевые эксперименты 35

3.3.1 1-я серия 35

3.3.2 2-я серия 36

3.3.3 Полевой эксперимент 37

3.4 Экономическое обоснование проекта 38

3.4.1 Потенциальные покупатели 38
3.4.2 Рынок приборов 39
3.4.3 Экономическая модель стартапа 40
3.4.4 Приборы-конкуренты 41
ВЫВОД 43
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 44

2. Введение

В ходе полевых изысканий гидрологам часто приходится встречаться с малыми водотоками, которые, несмотря на свою кажущуюся незначительность, являются основой для формирования гидрографической сети. Такие реки распространены по всей территории Российской Федерации повсеместно, чаще в горных районах, Карелии, Западной Сибири и на Дальнем Востоке. В ходе выполнения инженерно–гидрометеорологических изысканий гидролог должен получить наиболее достоверные морфометрические и гидравлические характеристики водотока, так как именно они ложатся в основу гидрологических расчетов при проектировании гидротехнических сооружений.

Определение морфометрических характеристик малого водотока (уклона, ширины потока, глубины потока, площади поперечного сечения) – процедура относительно простая, что обусловлено размерами исследуемой территории и возможностью выполнения инструментальных измерений.

Однако, как только задача переходит в плоскость исследования скоростного поля потока с малыми глубинами, гидролог сталкивается с задачей измерения гидравлических характеристик потока. Классический метод «скорость – площадь» с применением гидрометрической вертушки может оказаться недоступен ввиду того, что глубина потока может быть соизмерима с диаметром лопастей измерительного прибора, а иногда и меньше. Это приводит к тому, что требуется использовать другие методы измерения скорости потока.

Целью бакалаврской выпускной квалификационной работы является создание макета прибора для измерения скоростей потока в малых водотоках, который решит проблему, описанную выше.

Для ускорения измерений скорости потока в малых водотоках поставлены следующие задачи:

1) Рассмотрение существующих методов измерения скоростей потока;

2) Обзор существующих приборов для измерения скорости потока;
3) Проектирование и сборка макета прибора для измерения скорости потока в малых водотоках;
4) Апробация макета прибора в лабораторных и полевых условиях;
5) Экономическое обоснование прибора;
6) Анализ полученных результатов;

3. Методы измерения скорости потока

Скорость потока – это одна из составляющих расхода воды, которую выделили ещё в I в. до н. э. [1]. Данную составляющую возможно измерить с помощью приборов, классифицирующийся по характеру контакта с потоком на 5 основных методов [2]:

1) Метод, основанные на метках (индикации) течения в виде поплавков или вносимых в поток веществ;
2) Термогидрометры, в которых используется тепловое взаимодействие чувствительного элемента и обтекающих его струй;
3) Ультразвуковые установки, использующие различие в скоростях распространения звука по течению и против него;
4) Электромагнитные измерители скорости потока, основанные на определении разности потенциалов, возникающей в воде при протекании ее через электромагнитный контур;
5) Приборы, основанные на гидродинамическом взаимодействии с потоком воды.

Ниже рассмотрены данные группы методов измерения скорости потока.

3.1 Метод, основанные на метках течения в виде поплавков или вносимых в поток веществ

Метод измерения скоростей течения с помощью поплавков является одним из старейших и наиболее простых, не утратившим своего значения и в современной практике гидрологических изысканий, особенно при измерениях скоростей потока в малых водотоках.

В основе данного метода лежит прямое определение скорости как отношения расстояния, пройденного поплавком, ко времени его движения. В общем виде скорость течения вычисляется по формуле [1]:

$$v = \frac{L}{t}, \quad (1)$$

где L – длина участка, м; а t – время, за которое поплавок проходит участок, с.

Существует несколько видов поплавков [1]:

1) *Поверхностные поплавки* служат для определения скорости поверхности водотока. Они представляют собой лёгкие плавучие предметы, например пенопласт, пробка или подручные вещи, размер которых небольшой, для уменьшения влияния ветра на поплавок, а плотность материала меньше плотности воды для обеспечения плавучести.

2) *Глубинные поплавки* имеют плотность 1,05 кг/м^3, такая плотность нужна, чтобы поплавки не погружались и не всплывали в воде. Глубинный поплавок может применятся в системе из двух поплавков: небольшой поверхностный поплавок служит указателем местоположения, а глубинный, связанный с ним нитью, перемещается на определённой глубине. Средняя скорость такой системы является полусуммой скоростей обоих поплавков, поэтому скорость на глубине может быть найдена по формуле:

$$\nu_{\text{гл}} = 2 \cdot \nu_{\text{ср}} - \nu_{\text{пов}}, \quad (2)$$

где $\nu_{\text{пов}}$ – скорость поверхностного поплавка, м/с; $\nu_{\text{ср}}$ – средняя скорость потока, м/с.

3) Существуют *привязанные поплавки*. Их пускают с лодки или моста на размеченной тонкой нитке, с помощью которой определяют длину, на которую течением снесло поплавок.

4) Для определения средней скорости на вертикали служат *поплавки – интеграторы*. Принцип их действия основан на всплытии лёгкого тела (пузырёк воздуха, пластмассовый, пенопластовый или деревянный шарик, капля нефти [3] или масла) со дна потока и измерении горизонтального расстояния, на которое поплавок сносится течением за время всплытия. Средняя скорость на вертикали в этом случае равна [4]:

$$\nu = \frac{a}{H} L \quad (3)$$

Где a – скорость всплытия поплавка, м/с; H – глубина, м; L – длина сноса поплавка.

В поток возможно внести вещества создав так называемый *ионный паводок*. Суть ионного паводка заключается в определении расхода воды, “основанное на мгновенном введении в поток индикатора определённого объёма или массы и измерения степени его разбавления в некоторой точке”. Чем выше расход воды, тем больше разбавление вводимого раствора. Путь, которое пройдёт солевое облако, прямо пропорционально средней скорости потока [5].

Существует прибор, разработанный в Государственном гидрологическом институте, который предназначен для измерения очень малых скоростей течения – *электролитический отметчик скорости*. В этом устройстве в поток шприцем через трубку вводится метка в виде солевого раствора, а момент её прохождения мимо подвижных электродов фиксируется по замыканию сигнальной цепи. Скорость вычисляется аналогично привязным поплавкам [1].

3.2 Методы использующие термогидрометры

Метод измерения скоростей течения, основанный на использовании тепловых датчиков, т.е. термогидрометров, предназначен прежде всего для определения малых скоростей, где стандартные приборы, такие как вертушки, достигают предела измеряемой скорости потока [6]. Термогидрометры основаны на зависимости теплоотдачи нагретого чувствительного элемента от скорости обтекающей его жидкости [2].

Чувствительный элемент прибора (нить, плёнка, терморезистор) нагревается электрическим током до температуры, превышающей температуру воды. При обтекании потоком происходит охлаждение элемента, причём интенсивность теплоотдачи тем выше, чем больше скорость течения. Поддерживая температуру элемента постоянной либо измеряя изменение его электрического сопротивления, можно установить однозначную связь между

отводимой тепловой мощностью и локальной скоростью потока. Далее регистрируемый электрический сигнал преобразуется в значение скорости потока.

Основное уравнение теплового баланса записывается в виде:

$$\mathrm{G} = \alpha(\Theta - \mathrm{t})\mathrm{S}\tau, \quad (4)$$

где G – количество тепла, отдаваемое поверхностью тела, дж; $\alpha(u)$ – коэффициент теплоотдачи, зависящий от скорости потока, Θ – температура тела, °С; t – температура среды, °С; S – площадь поверхности датчика, м^2; τ – время, с.

Согласно теории регулярного режима, остывание тела описывается показательной функцией:

$$\theta = \theta_0 e^{-\mathrm{m}(\tau-\tau_0)}, \quad (5)$$

где θ_0 – разность температур в начальный момент времени, °С; m – темп охлаждения, 1/час.

Связь темпа охлаждения с коэффициентом теплоотдачи и физическими свойствами тела выражается формулой:

$$m = \frac{a\psi S}{C}. \quad (6)$$

Здесь C – полная теплоемкость тела, а ψ – безразмерный коэффициент, характеризующий неравномерность распределения температур внутри тела ($0<\psi\leq1$). Предельный случай ($m\infty$) определяется коэффициентом температурной проводности материала a и коэффициентом формы тела k.

К достоинствам термогидрометров относятся: высокая чувствительность при малых скоростях течения, малая инерционность, отсутствие механических частей. К ограничениям относятся зависимость измерений от температуры воды и загрязнение чувствительного элемента взвешенными наносами.

3.3 Ультразвуковые методы измерения скорости потока

Ультразвуковые методы измерения скоростей потока основаны на различии времени прохождения акустических импульсов по направлению течения и против него. Этот способ позволяет получать мгновенные значения расхода воды без нарушения структуры потока.

Так как основой метода является поведение ультразвуковой волны в потоке воды, то существует ряд особенностей, которые требуется учитывать при выборе места измерения скорости. Участок должен быть прямолинейным, постоянным и с отсутствующей растительностью в русле. Поток не должен содержать пузырьков воздуха, рассеивающих ультразвук, поэтому установки размещают вдали от зон бурного течения и аэрации. Также непригодны участки со значительной термической стратификацией, способной преломлять и рассеивать сигналы. Взвешенные частицы препятствуют распространению ультразвука, и обычно измерения проводят при мутности не более 100–150 г/м³ [2].

К ультразвуковым методам также относятся и те, которые используют эффект Доплера. Сигнал определенной частоты, посылаемый в поток излучателем, отражается от движущихся в потоке минеральных и органических частиц и возвращается к приемнику ультразвука, имея уже другую частоту. Частота отраженного сигнала зависит от скорости движения частиц. По разнице частот излученного и отраженного сигналов определяется скорость потока. Данная разница называется доплеровское смещение частоты. Главным преимуществом данного метода измерения скорости потока является отсутствие потребности иметь непосредственный контакт с прибором, что позволяет его использовать в агрессивных средах [6].

3.4 Электромагнитные методы измерения скорости потока

Электромагнитный метод измерения скорости потока основан на законе электромагнитной индукции Фарадея. Если проводящая жидкость движется в магнитном поле, направленном перпендикулярно потоку, в ней индуцируется

электрическое поле, а между двумя точками (электродами) возникает ЭДС, пропорциональная средней скорости потока [7].

Магнитное поле с индукцией B прикладывается перпендикулярно направлению движения жидкости. Согласно закону Фарадея, ЭДС v_e, возникающая между электродами, расположенными в точках a и b на расстоянии L, определяется выражением:

$$v_e = \int_a^b uBdL, \tag{7}$$

Где u – скорость жидкости, м/с; B – индукция, Тл; L – расстояние между точками a и b, м. При однородном распределении поля и скорости, а также ортогональности векторов B, u и L, формула упрощается до:

$$v_e = uBL \tag{8}$$

Таким образом, измеряемое напряжение прямо пропорционально средней скорости потока. Электроды изготавливают из химически стойких металлов (например, платины), тип которых зависит от свойств измеряемой жидкости.

Несмотря на потенциально высокую точность (до 1 %), реальные измерения могут сопровождаться рядом погрешностей:

- Зависимость показаний от профиля потока – соотношения справедливы только для аксиально-симметричного течения; при известной асимметрии требуется вводить поправочный коэффициент;
- Электрохимическая разность потенциалов между электродами (подобная гальваническому элементу), создающая напряжение смещения нуля;
- Коррозия или осаждение посторонних материалов на электродах, изменяющие их сопротивление;
- Неоднородность магнитного поля, вызывающая циркулирующие в жидкости локальные токи и, как следствие, погрешности.

3.5 Методы, использующие гидродинамические приборы.

Методы измерения скоростей, основанные на гидродинамическом взаимодействии чувствительного элемента с потоком, являются основой гидрометрических измерений. В отличие от поплавков, данные приборы преобразуют кинетическую энергию движущейся воды непосредственно в механическое движение или перепад давлений, что позволяет получать количественные значения скоростей в назначенных точках. К данной группе измерителей скорости потока относятся: гидрометрические вертушки, трубки Пито и различные маятниковые устройства, однако наиболее широкое распространение благодаря своей надежности и точности получили именно гидрометрические вертушки.

Гидрометрическая вертушка представляет собой измерительное устройство, действие которого основано на преобразовании поступательного движения потока во вращение лопастного винта. Этот принцип регистрации скоростей определил развитие целого класса приборов – гидрометрических вертушек, которые уже более двух столетий остаются главным инструментом для измерения скоростей течения и вычисления расходов воды. Фактически вся государственная система учёта водных ресурсов в России и в большинстве других стран мира опирается на данные измерений, полученных с помощью вертушек.

Создателем гидрометрической вертушки принято считать немецкого гидротехника Рейнгарда Вольтмана, применившего прибор в 1790 г. для определения скоростей течения р. Эльба.

До 1950-х годов регистрация времени измерения осуществлялась с помощью секундомера, а механический принцип регистрации числа оборотов лопастного винта был заменён на электрическую сигнализацию, замыкающей электрическую цепь через определенное количество оборотов ротора вертушки.

Другой разновидностью приборов гидродинамического действия являются гидрометрические трубки, работающие по принципу преобразования скоростного напора в пьезометрический. Традиционные трубки имеют высокий предел чувствительности из-за сил поверхностного натяжения (менисков) в измерительных каналах, что делает их непригодными для малых скоростей. Для преодоления этого ограничения во ВНИИГиМ были разработаны безменисковые гидрометрические трубки, в которых жидкость в каналах приводится в поступательное движение, что позволяет измерять скорости до 3 см/с [8].

К этой же группе приборов относят появившиеся позднее измерители с электронно-механическими преобразователями (механотронами) для гидрометрических трубок, где мембрана воспринимает перепад давления и преобразует его в электрический сигнал. Данные устройства позволяют автоматизировать процесс измерений, производить интеграционные измерения скорости потока и регистрировать пульсации скорости в турбулентном потоке.

4. Приборы для измерения скорости потока

На данный момент времени разработано огромное множество инструментов и приборов для измерения скорости потока, одни из которых успешно используются в практике гидрологических изысканий, а другие существуют лишь в виде макета

В данной главе выпускной квалификационной работы рассмотрены современные приборы для измерения скорости потока, согласно классификации из первой главы.

2.1. Поплавки

Как писалось выше, *поверхностные поплавки* могут быть сделаны из подручных средств, ими могут стать шишки, маленькие деревяшки, деревянные пробки, пластмассовые крышки и т. п. Но поплавки возможно подготовить заранее, тогда они могут иметь один из видов, представленных на Рисунок 1.

Поплавки могут быть изготовлены из отрезанной части ствола дерева в виде цилиндра, вырезаны из дерева или пенопласта сферой, или выполнены в виде крестовины из двух дощечек. Данные формы хорошо видно на поверхности воды.

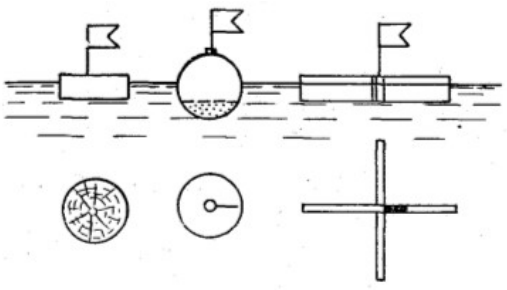


Рисунок 1. Виды поверхностных поплавков.

Глубинные поплавки представляют собой систему, состоящую из двух частей, соединённых тонкой нитью: верхний поплавок, изготовляемый из пробки или пенопласта, имеет небольшой размер и служит лишь индикатором местоположения системы на поверхности воды; нижний поплавок, имеющий в 4–5 раз большие размеры и обладающий такой плавучестью, чтобы удерживаться на расчётной глубине, является основным чувствительным элементом.

Благодаря разнице в размерах и положении в потоке скорость перемещения всей системы практически полностью определяется скоростью течения на глубине погружения нижнего поплавка. Глубинные поплавки представлены на Рисунок 2.

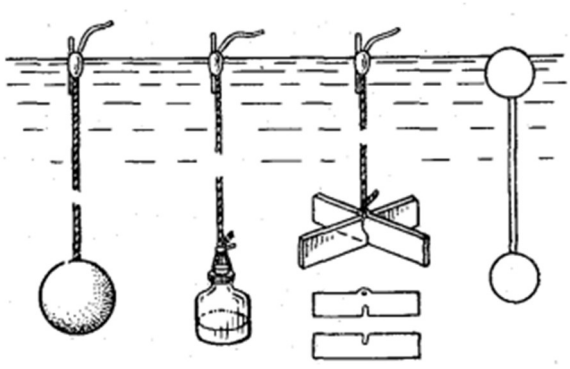


Рисунок 2. Виды глубинных поплавков

Один из способов измерить скорость потока является интегральный метод. Суть метода заключается в измерении скорости потока по всей глубине за одну единицу измерения. Существует множество вариаций инструментов, использующих данный метод измерения скорости потока, но они все сводятся к двум основным инструментам: *поплавок-интегратор* и *гидрометрический шест*.

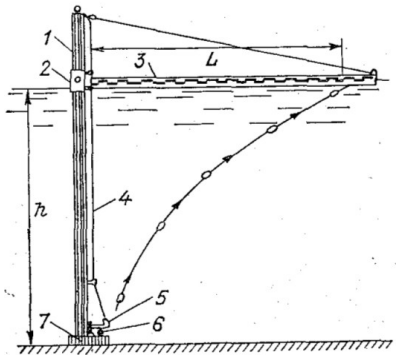


Рисунок 3. Интеграция с помощью поплавка

Конструкция базового инструмента, использующего поплавки-интеграторы в виде сфер из дерева, простая (Рисунок 3) [1]. Инструмент состоит из: 1) штанги; 2) обоймы; 3) рейки; 4) шнура; 5) накладки; 6) поплавка; 7) поддона. Поплавок закладывается в углубление поддона штанги. Поддон закрывается накладкой, предохраняющей поплавок от преждевременного всплытия.

Накладка с помощью шнура может подниматься вверх и освобождать поплавок. Горизонтальная рейка соединена со штангой и может свободно перемещаться по ней. По горизонтальной рейке определяется расстояние сноса поплавка. По формуле (3) определяется средняя скорость потока.

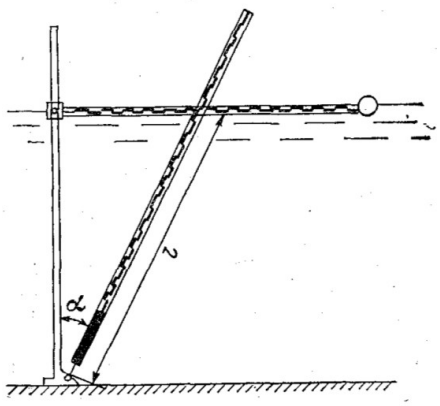


Рисунок 4. Интегрирующий шест закреплённый.

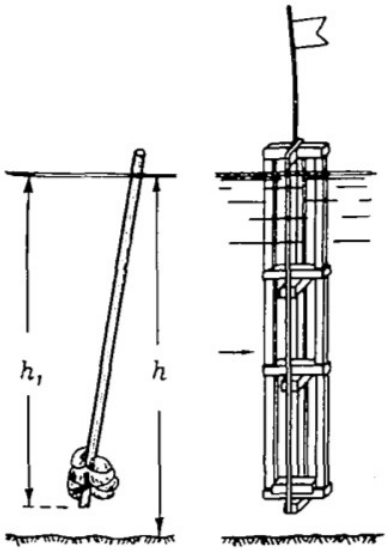


Рисунок 5. Интегрирующий шест не закреплённый.

Гидрометрический шест имеет два варианта: прикреплённый ко дну (Рисунок 4) [1] и не прикреплённый ко дну (Рисунок 5) [9].

Первый вариант удобен для измерения малых скоростей течения в речных руслах с зарастанием и коллекторно-дренажных каналах. Средняя скорость на вертикали является функцией угла отклонения шеста α и длины его смоченной части l. Градуировочная зависимость для конкретного шеста может быть получена в результате тарирования в каналах и лабораторных лотках.

Второй вариант позволяет определить среднюю скорости по глубине на некотором участке. Пригруженный с одного конца шест запускается в поток таким образом, чтобы он перемещался с малым наклоном, сохраняя положение, близкое к вертикальному, а его нижний конец находился на минимальном расстоянии от дна, не соприкасаясь с ним.

2.2. Термогидрометры

Структура термогидрометра подробно описана в учебном пособии В. Д. Быкова и А. В. Васильева [9]. Принцип прибора изначально был применён в метеорологии для измерения скорости ветра, затем был использован для измерения скорости потока воды.

Одна из схем действия прибора заключается в следующем: через платиновую проволоку пропускается электрический ток, который нагревает её. В потоке воды проволока охлаждается тем сильнее, чем выше скорость

течения. Охлаждение приводит к изменению электрического сопротивления проволоки, которое отмечается прибором.

Использование платиновой проволоки выявило две проблемы: проволока требует производить частые тарировки и обладает небольшой механической прочностью. Из-за данных проблем платиновая проволока была заменена на платиновую плёнку, нанесенную на стеклянное или кварцевое основание.

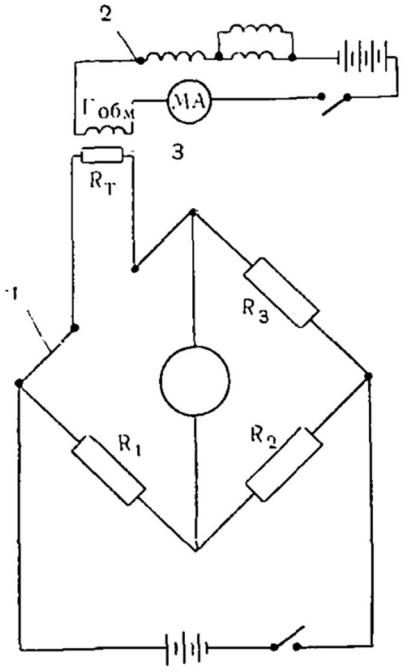


Рисунок 6. Схема термогидрометра с полупроводниковым термосопротнвлением

Другая схема прибора с полупроводниковыми термодатчиками представлена наРисунок 6. Устройство такого датчика включает термосопротивление и нагреватель. Электрическая схема состоит из двух отдельных контуров: измерительного и подогревающего. Термосопротивление включено в одно из плеч измерительного моста, а подогреватель служит для создания перепада температур между датчиком и текучей средой. По перепаду определяется скорость течения

2.3. Ультразвуковые приборы

Ультразвуковые приборы своей целью имеют измерение расхода воды, поэтому конечному потребителю они предоставляют именно сток, а не скорость. Но для расчёта расхода воды эти приборы считывают площадь живого сечения и скорость потока по всей глубине.

Радарные бесконтактные расходомеры (Рисунок 7. Принцип работы радарного бесконтактного расходомера.7) измеряют расход воды методом

«скорость-площадь», то есть измеряют уровень и скорость потока. Применяются в открытых каналах и закрытых безнапорных трубопроводах [10].

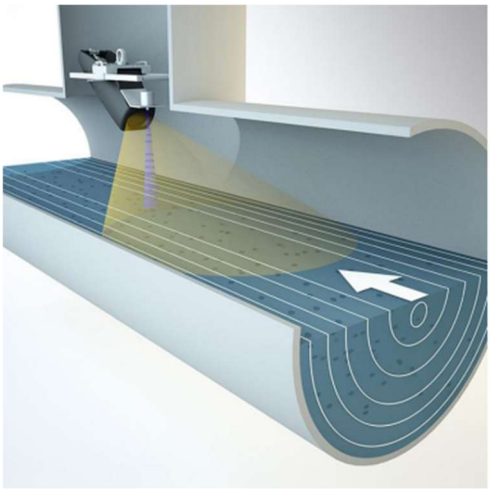


Рисунок 7. Принцип работы радарного бесконтактного расходомера.



Рисунок 8. Радарный бесконтактный расходомер на гидрометрическом мостке.

Главное преимущество радарного расходомера – простой и удобный принцип установки и обслуживания, так как бесконтактный датчик находится над поверхностью потока и не имеет контакта с водой.

К недостаткам данных устройств относится значительная погрешность, способная достигать 50 %. Она возникает из-за высокой чувствительности датчика к волнению на поверхности воды. Кроме того, отсутствует однозначная связь между скоростью течения на поверхности и средней скоростью потока, из-за этой проблемы этот прибор условно можно назвать “умным поплавком”. Существенным минусом является и высокая стоимость приборов.

Доплеровские расходомеры, принцип действия которых описан в первом разделе, могут быть как стационарными, так и на плавающей платформе (профилограф). Принцип первого представлен на рисунке 9, а принцип второго – на рисунке 10.

В полевых изысканиях и на постах гидрографической сети применяются профилографы – это измерительный комплекс, который позволяет получить профили глубин русла и скоростей течения при пересечении водотока.

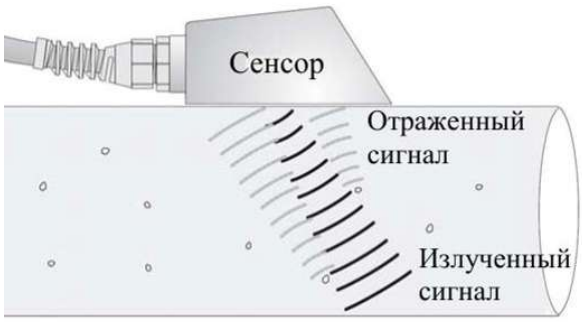


Рисунок 9. Принцип действия стационарного доплеровского расходомера

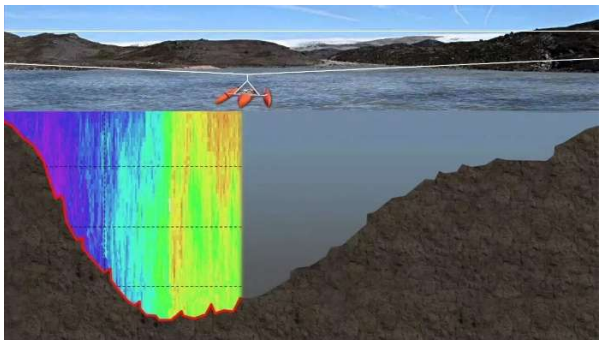


Рисунок 10. Принцип действия доплеровского расходомера на плавучей базе в виде катамарана (профилограф)

Принцип действия профилографов базируется на излучении в водную среду коротких ультразвуковых импульсов фиксированной частоты. Присутствующие в толще воды частицы (отражатели) рассеивают сигнал обратно в направлении приемного датчика. Вследствие эффекта Доплера частота отраженного импульса претерпевает сдвиг, величина которого прямо пропорциональна скорости перемещения частиц, а следовательно, и скорости потока.

Вертикальный водный столб дискретизируется ультразвуковым лучом на множество сегментов, именуемых «ячейками глубины». Для построения вертикальной эпюры (профиля) скоростей течения обработка отраженного сигнала осуществляется индивидуально для каждой выделенной ячейки. Далее отраженный импульс посредством программного обеспечения оцифровывается в массив точек, что позволяет вычислить гидравлические характеристики потока как в локальной точке, так и интегрально по всей глубине.

Принятая система профилирования опирается на два допущения:

- Отражающий объект перемещается синхронно с водным потоком, обладая идентичной скоростью;
- Все четыре акустических луча датчика функционируют в идентичных условиях.

Принципиально важно отметить, что профилограф регистрирует движение воды относительно самого прибора. Для определения действительной скорости потока необходимо исключить скорость движения датчика (или судна-носителя) относительно дна. Таким образом, истинная скорость воды вычисляется как векторная разность между скоростью, зарегистрированной в «ячейке глубины», и скоростью перемещения самого датчика.

При пересечении поперечного сечения водотока производится непрерывное вертикальное профилирование скоростей течения и глубин потока. Расход воды рассчитывается путем суммирования элементарных расходов по каждому ансамблю (вертикальному сегменту с группой данных). Количество «ячеек глубины» в вертикальном ансамбле, в пределах которых выполняются измерения скоростных компонентов, может определяться автоматически (в зависимости от максимальной глубины потока и заданного режима профилирования) либо задаваться оператором вручную посредством специализированной команды [11].

В качестве примера доплеровских профилографов возможно привести “Енисей-300”, “Stream Pro”, “Rio Grande” [12]

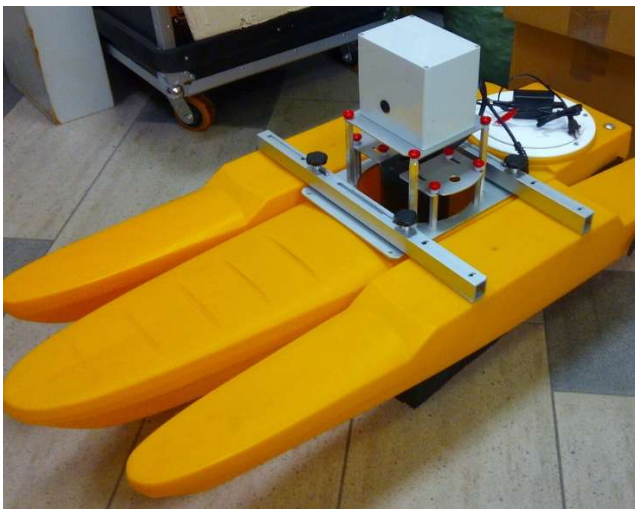


Рисунок 11. Профилограф “Енисей-300”

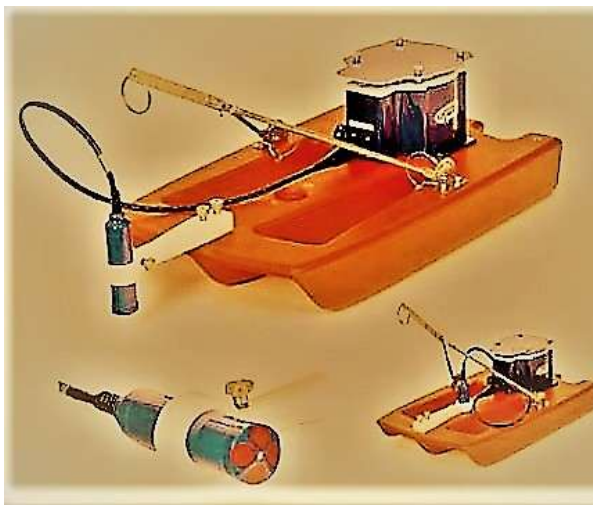


Рисунок 12. Профилограф “River Pro”

2.4. Электромагнитные приборы

Современные электромагнитные измерители скорости водного потока (ЭМИС) основаны на законе электромагнитной индукции Фарадея. Принцип действия заключается в следующем: при движении электропроводящей жидкости (воды) в магнитном поле в ней индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости потока. Электромагнит внутри немагнитного обтекателя создает магнитное поле, а электроды на внешней поверхности преобразователя воспринимают возникающую разность потенциалов. Электронный модуль обрабатывает сигнал и выводит значение скорости на дисплей [13].

Ключевые преимущества электромагнитных измерителей скорости:

- Отсутствие движущихся частей, что повышает надежность и исключает механический износ;
- Высокая чувствительность при малых скоростях течения (низкий порог измерения);
- Возможность работы в загрязненных и заросших водотоках, где применение вертушек затруднено;

- Линейная характеристика преобразования, не зависящая от физико-химических свойств воды (при соблюдении минимальной электропроводности)

2.5. Гидродинамические приборы

2.5.1 Гидрометрические вертушки

История развития и применения гидрометрических вертушек подробна описана в статье Д. Е. Клименко [14]

История гидрометрических вертушек, как отмечалось ранее, началась в 1790 году на реке Эльба, где немецкий гидротехник Рейнгард Вольтман впервые применил своё изобретение.

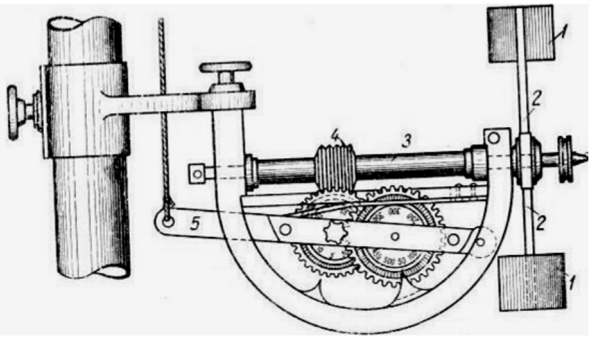


Рисунок 13. Конструкция счётчика Р. Вольтмана

Вертушка конструкции Р. Вольтмана (Рисунок 13) была оснащена крыльчаткой, состоящей из четырех пластин, закрепленных на горизонтальной оси посредством спиц и расположенных под углом к плоскости вращения. Ось вращения, установленная в открытом корпусе, соединялась с червячной передачей, которая приводила в движение шестерню, смонтированную на шарнирной раме. В передней части корпуса (ориентированной навстречу потоку) ось фиксировалась с помощью шарикоподшипника, тогда как в задней части она опиралась на агатовый подпятник. В нормальном положении шарнирная рама отжималась пружиной вниз, что позволяло размыкать сцепление вращающейся оси с шестерней. Для запуска прибора рама поднималась тросом, обеспечивая зацепление шестерни с осью. Количество оборотов крыльчатки фиксировалось по шкале, нанесенной на окружности шестерни, где каждый зуб соответствовал одному полному обороту, а указатель был закреплен на раме, что позволяло

определять сумму оборотов по разнице начального и конечного отсчетов. Время измерений регистрировалось секундомером.

Только спустя более 150 лет в 50-х годах XX века секундомер будет заменён электрической сигнализацией, замыкающей электрическую цепь через определенное количество оборотов.

В современных гидрологических изысканиях применяется гидрометрическая вертушка ГР-21М (Рисунок 14) совместно с преобразователем сигналов вертушки ПСВ-1 (Рисунок 15). ПСВ это, по сути, небольшой компьютер, обрабатывающий электромагнитные сигналы от вертушки и перерассчитывающий количество оборотов в скорость потока в м/с.



Рисунок 14. ГР-21М



Рисунок 15. ПСВ-1

У гидрометрической вертушки есть ограничения при измерениях в малых водотока: вертушка может измерить скорость потока только свыше 0.04 м/с и до 5 м/с, скорость потока в малом водотоке может быть меньшие скорости течения; требуется глубина свыше диаметра лопастного винта вертушки.

Для решения второй проблемы сконструирована гидрометрическая микровертушка ГМЦМ-1М (рисунок 16). Вертушка имеет небольшой диметр лопастей, однако минимальная скорость потока, требуемая для сдвига лопастей лишь чуть меньше, чем у ГР-21М, и составляет 0.03 м/с.

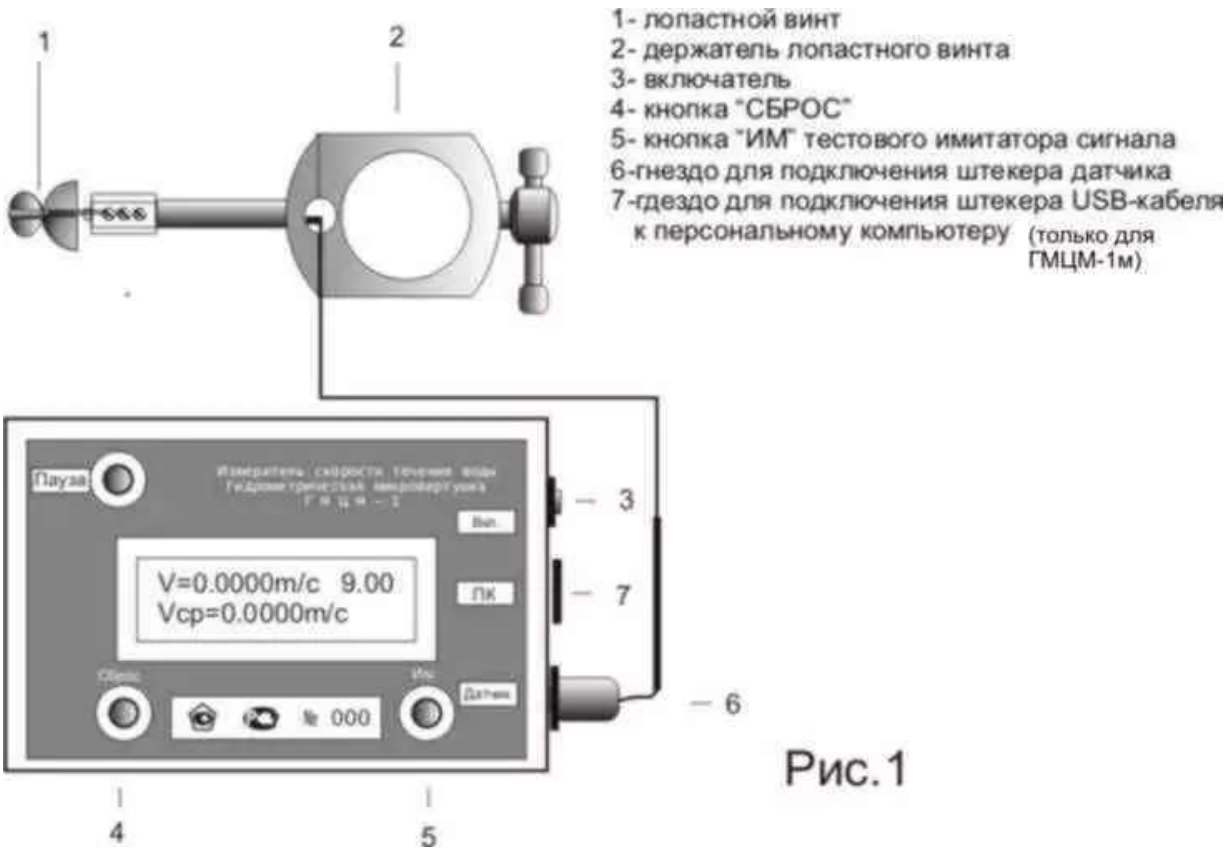


Рисунок 16. ГМЦМ-1М

2.5.2 Трубки Пито

Гидрометрические трубки были изобретены в 1732 году французским инженером-гидротехником Анри Пито. Трубки Пито относятся к приборам для измерения местных скоростей течения воды. Их действие основано на регистрации величины скоростного напора.

Скорость течения определяется в зависимости от величины скоростного напора. Для этого трубка вводится в поток отверстием навстречу течению. Основой является уравнение Бернулли. Местная скорость определяется по формуле [9]:

$$u_1 = \sqrt{2gh}, \tag{9}$$

Где h – это высота скоростного напора (разность пьезометрических высот)

Выражение (9) справедливо для идеальной жидкости. Для учёта реальной жидкости вводится поправочный коэффициент φ, который определяется с помощью тарирования трубки.

$$u = \varphi\sqrt{2gh}, \quad (10)$$

Части трубки (рисунок 17): 1) приёмная трубка; 2) динамическое отверстие; 3) статическое отверстие; 4 и 5) резиновые шланги; 6) манометр; 7) тройник; 8) кран; 9) шланг к воздушному насосу.

Конструктивно приёмная часть трубки имеет:

- Динамическое отверстие — направлено навстречу потоку.
- Статические отверстия — расположены на боковой поверхности перпендикулярно потоку (иногда заменяются кольцевой щелью). Они располагаются там, где гидродинамическое давление равно нулю, и измеряют только гидростатическое давление.

Вертикальная часть трубки имеет два канала, соединенных с U-образным манометром. Для удобства отсчета уровни в обоих трубках поднимаются с помощью насоса (рисунок 17).

Основной недостаток гидрометрическая трубки не позволяет измерять скорости менее 0,2 м/с, так как при меньших скоростях разность уровней в манометре очень мала.

Гидрометрические трубки (включая модификации) широко используются при научных исследованиях, главным образом в лабораторных условиях (в гидравлических лотках). Существует большое количество конструкций для различных целей.

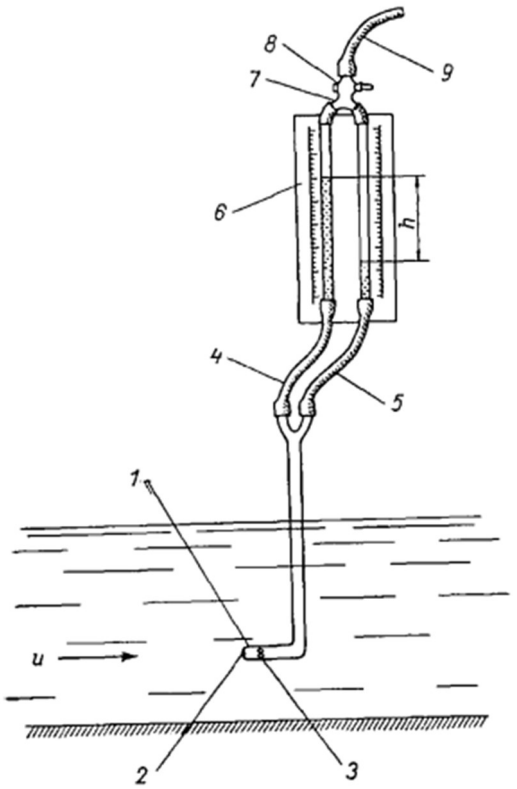


Рисунок 17. Конструкция трубки Пито

Причины ограниченного применения в полевых условиях (в реках):

- Не портативны (громоздки и сложны в установке);
- Сложность установки в поток;
- Невозможность использования в реках с большим количеством наносов (забиваются отверстия);
- Невозможность использования в зимних условиях.

3. Макет прибора для измерения скорости потока в малых водотоках

При проектировании макета наиболее главным вопросом является то, каким методом будет производится измерение скорости потока. Ранее была обозначена проблема измерения скорости потока в малых водотоках гидрометрической вертушкой, как основного прибора для измерения скорости потока. Проблема заключается в пределах измерения с помощью прибора.

У вертушки есть ограничения в виде минимальных размеров и скорости водного потока. Если глубина небольшая, то вертушка не поместится в поток. Также скорость воды может быть настолько мала, что её не хватит кинетической силы для сдвига лопастей вертушки.

Поэтому одной из задач прибора должна быть работоспособность в водотоках, которые не позволяют проводить измерения с помощью гидрометрической вертушки.

Может возникнуть вопрос: почему бы тогда не воспользоваться поплавком? У поплавкового метода измерения скоростей есть существенный минус, заключающийся в том, что поплавок измеряет поверхностную скорость. Зачастую в практических изыскания хватает и этих данных, но для более детального исследования водотока требуется исследование по всей глубине потока.

Исходя из выше обозначенной проблемы, прибор должен решать задачу измерения скорости потока по всей глубине.

Также прибор должен быть простым в конструкции для обеспечения надёжности в полевых изысканиях. Масса прибора не должна быть большой, а форма прибора наиболее удобной для походно-полевых условий.

Исходя из задач и заданных технических характеристик был выбран наиболее простой метод измерения скорости потока: интеграционный методы с использование поплавков. Данный метод наиболее простой, а также более точный, чем при использовании обычных поплавков.

В качестве поплавков были выбраны пузырьки воздуха, так как их не требуется изготавливать. Данный тип поплавков требует учёта динамики всплытия пузырьков в воде, а также средство для доставки поплавков-интеграторов ко дну потока.

Расчёт скорости потока производится по формуле (3). Скорость всплытия пузырьков определяется с помощью тарирования в стоячей воде.

3.1Пузырьки воздуха в водной среде

Поведение пузырьков воздуха в водной среде зависит в первую очередь от формы частицы. А форма пузырька зависит от баланса трёх сил: инерции, вязкости и поверхностного натяжения. Ключевыми безразмерными параметрами являются число Рейнольдса (Re) и число Этвёша (Eo) [15].

Число Рейнольдса это безразмерная величина, которая показывает, какой режим течения жидкости или газа преобладает: спокойный слоистый (ламинарный) или хаотичный с перемешиванием (турбулентный). Т. е. это отношение сил инерции (которые разгоняют поток и срывают слои) к силам вязкого трения (которые тормозят поток и удерживают слои вместе).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}; \tag{11}$$

Где ρ – плотность жидкости, кг/м^3; v – характерная скорость потока, м/с; D – характерный линейный размер, м; μ – динамическая вязкость, Па·с.

Число Этвёша это безразмерная величина в гидродинамике, которая характеризует форму пузырей или капель, всплывающих в жидкости. Она показывает соотношение между гравитационными силами (весом) и силами поверхностного натяжения. Оно показывает, насколько сильно гравитация пытается сплющить или деформировать пузырь (каплю), а поверхностное натяжение – удержать форму сферы.

$$\mathrm{E}o = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot L^2}{\sigma}; \tag{12}$$

Где $\Delta\rho$ – разность плотностей двух сред, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2); L – характерный размер капли или пузыря, м; σ – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела сред, Н/м.

В «Bubbles, Drops, and Particles» [15] представлена диаграмма Грейс-Уэйреда, зависимость режимов формирования пузырьков и капель при беспрепятственном гравитационном движении в жидкостях в зависимости от числа Рейнольдса и числа Этвёша в разных средах по числу Мортона (приложение 1). Диаграмма читается правильно так: «У меня есть жидкость с вязкостью, плотностью и натяжением (Mo задано). Я хочу получить пузырь размером D (Eo задано). Какую скорость он будет иметь (Re)?»

Число Мортона (Mo) это безразмерная величина, которая характеризует саму жидкость и показывает, насколько легко пузырю или капле сохранять сферическую форму в этой жидкости. По сути, это параметр «сложности» жидкой среды: высокое значение числа означает очень вязкую, маслянистую жидкость, а низкое – воду или жидкий металл. Число Мортона уникально тем, что в нем нет ни диаметра пузыря, ни его скорости. Оно строится только на физических свойствах жидкости:

$$Mo = \frac{g \cdot \mu^4 \cdot \Delta\rho}{\rho^2 \cdot \sigma^3}; \quad (13)$$

Где g – ускорение свободного падения, м/с^2; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с; ρ – плотность жидкости, кг/м^3; $\Delta\rho$ – разность плотностей жидкости и газа, кг/м^3; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

По диаграмме выделено три основных режима формирования формы частицы жидкости:

1. Область сферических пузырьков (d<1 мм, Re<100);
2. Область эллипсоидных пузырьков (d=2÷6 мм, Re=100÷800);
3. Область пузырьков в форме сферических сегментов (чаш) (d>7 мм, Re>800).

Частицы разных форм всплывают по-разному. Так, циркуляция внутри пузыря воздуха может ускорить его движение относительно твердой сферы того же размера (поправка Адамара-Рыбчинского) [15].

Классический закон Стокса, которым мы пользуемся для расчета силы сопротивления шара в вязком потоке, выведен для жесткой сферы с неподвижной границей. Частицы жидкости на поверхности такого шара прилипают к нему. Это справедливо для пылинок, твердых шариков или эмульсий, покрытых жесткой пленкой. Но пузырь газа в жидкости или капля одной жидкости в другой не является твердым телом. Граница раздела подвижна, и внешний поток увлекает за собой жидкость или газ внутри капли, вызывая там циркуляцию. Это меняет профиль обтекания снаружи и снижает сопротивление.

В 1911 году независимо друг от друга француз Жак Адамар и поляк Витольд Рыбчинский математически решили задачу Стокса для сферической капли с учетом вязкости внутренней жидкости. Они получили поправочный коэффициент, который учитывает динамику пузыря газа или капли другой жидкости в другой. Внешняя жидкость «цепляет» поверхность пузыря (капли), та начинает вращаться, увлекая внутреннее содержимое. Градиент скорости на границе сглаживается, сопротивление падает, а скорость, соответственно, растет.

При эллиптическом режиме формирования формы частицы пузырь начинает колебаться и двигаться зигзагообразно или по спирали. Скорость в этой зоне может слабо зависеть от размера или даже падать с его ростом [16].

При режиме сферических сегментов инерция жидкости настолько велика, а поверхностное натяжение так мало относительно размера, что пузырь напоминает шапку гриба или разрезанный пополам апельсин. Поверхностное натяжение перестает играть роль, а значит лобовое сопротивление формируется только формой [16].

Существует несколько типов движения частиц [15]:

- Прямолинейное движение ($d<1,3$ мм, $Re<565$);

- Винтовое (спиральное) движение (d=1,3÷2,0 мм, Re=565÷880);
- Зигзагообразное (d=2,0÷4,2 мм, Re=880÷1510);
- Прямолинейное с раскачиванием (d>4,2 мм, Re>1510).

Данная классификация сделана по графику, изображённому на Рисунок 18.

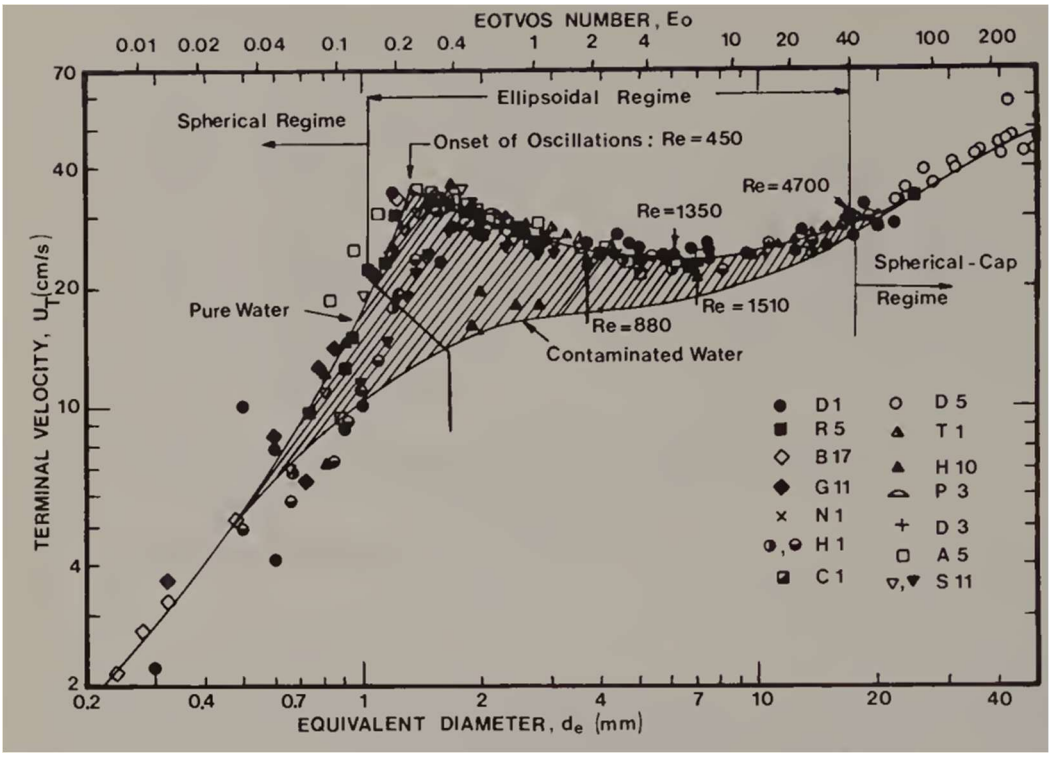


Рисунок 18. Конечные значения пузырьков воздуха в воде при 20°C

Спиральное и зигзагообразное движение частиц обусловлено тем, что за движущейся частицей пузырька (капли) образуется область пониженного давления, так называемый вихревой след. При определённой скорости этот след становится нестабильным из-за формы частицы, что влияет на её раскачивание в разные стороны.

При прямолинейном типе движения след присоединен и стабилен. Вихри не срываются. Пузырек идеально круглый и плывет строго вверх. При увеличении диаметра частицы и числа Рейнольдса начинается срыв вихрей, но не плоский, а винтовой. Вихри срываются по спирали, закручивая пузырек. Траектория — восходящая спираль. При переходе в следующий зигзагообразный тип срыв вихрей происходит в одной плоскости. Это самый

интенсивный режим перемешивания. Постепенно с дальнейшем увеличением параметров срыв вихрей стабилизируется. Пузырек снова плывет вверх, но его форма и кормовая часть совершают периодические колебания.

На динамику всплытия пузырьков воздуха также влияет поверхностно-активные вещества (ПАВ) – это химические соединения, которые концентрируются на границе раздела двух фаз (например, жидкости и газа или двух жидкостей), вызывая значительное снижение поверхностного (межфазного) натяжения.

Эффект ПАВ объясняется созданием градиента поверхностного натяжения вдоль поверхности пузырька. В зависимости от концентрации различают три модели распределения ПАВ [17]:

- Малое количество (модель «затвердевшей кормовой части»): подвижность сохраняется только на носике пузырька, кормовая часть заторможена;
- Среднее количество (модель «полного затвердевания»): вся поверхность пузырька становится неподвижной относительно окружающей жидкости;
- Высокое количество: при очень высоких концентрациях торможение может ослабевать («восстановление подвижности»).

В присутствии ПАВ наблюдается деформация пузырьков, особенно заметная при больших диаметрах. У пузырьков появляется вытянутый «хвост» в кормовой части. Это объясняется тем, что молекулы ПАВ сносятся потоком с передней полусферы на кормовую, локально изменяя там свойства поверхности [18].

При добавлении ПАВ в жидкость (например, додецилсульфата натрия в воду или глицерин) происходит «затормаживание» поверхности пузырька. Если в чистой жидкости граница пузырька подвижна (что соответствует модели Адамара–Рыбчинского с низким сопротивлением), то ПАВ делает её жесткой. Это переводит движение в стоксовский режим, характерный для твердой сферы, что приводит к увеличению коэффициента сопротивления и, как следствие, уменьшению скорости всплытия пузырька [18].

Динамика всплытия одного пузырька воздуха отличается от динамики всплытия кластера пузырьков воздуха. Если один пузырёк движется под действием силы Архимеда, силы тяжести и гидродинамического сопротивления жидкости и взаимодействие происходит только между пузырьком и окружающей жидкостью, а вихревой след формируется за ним и не влияет на его собственное движение, кроме случаев высокой турбулентности, то при движении кластера пузырьков между ними возникает сложное взаимодействие. Они влияют на поле течения друг друга. При достаточно высокой концентрации возникает так называемый эффект «частично продуваемого облака» – вихри, срывающиеся с передних пузырьков, ускоряют движение задних, что приводит к росту скорости всего кластера по сравнению со скоростью одиночного пузырька того же диаметра.

Это прослеживается и в законе сопротивления (C_D) для одиночного пузырька в чистой и технической воде (с ПАВ) (14 и 15 соответственно) [15] и для кластера в чистой и технической воде (16 и 17 соответственно) [18].

$$C_D \approx \frac{16}{Re}; \tag{14}$$

$$C_D \approx \frac{24}{Re}; \tag{15}$$

$$C_D \approx \frac{11{,}3}{Re}; \tag{17}$$

$$C_D \approx \frac{18{,}8}{Re}; \tag{18}$$

Внутри компактного кластера отдельные пузырьки могут деформироваться сильнее, чем одиночные. В частности, в присутствии ПАВ у пузырьков внутри кластера наблюдается образование «хвостов» (вытянутая кормовая часть), что не характерно для одиночного всплытия при тех же числах Рейнольдса. Сама форма кластера в целом может оставаться сферической, но отдельные элементы внутри него теряют сферичность [18].

3.2 Проект макета прибора

Основой прибора решено сделать гидрометрическую рейку ГР-104, так как инструмент эргономичен и удобен для использования в полевых условиях. С помощью рейки также возможно измерить уровень, параллельно с измерением скорости потока. Пределом измерения уровня с помощью ГР-104 является 100 см, что является достаточным для применения на малых водотоках.

Для подачи воздуха ко дну требуется трубопровод и устройство для перемещения газа. В первоначальной конструкции макета прибора предполагалось подача воздуха через полое пространство ГР-104, где воздух подаётся в районе ручки, проходит через всю трубу и выходит через отверстие внизу трубы. Однако, данная конструкция оказалась не жизнеспособной на практике, по причине заливания воды в ГР-104 и большой величины объёма пространства в полости инструмента.

Для решение этих проблем решено провести трубопровод снаружи ГР-104. В качестве трубопровода используется силиконовая пищевая трубка с внутренним диаметром 3 мм, внешним диаметром 5 мм. Трубка прикреплена к ГР-104 с помощью кабельной стяжки (хомут кабельный) через каждые 20 см.

В качестве силовой установки используется портативный электрический автомобильный воздушный насос с максимальным рабочим давлением 10,3 бар.

Так как скорость потока определяется методом поплавков-интеграторов, требуется знать глубину, величину расстояния сноса поплавков течением и скорость всплытия поплавков. Если глубина определяется по гидрометрической рейке, то для того, чтобы знать расстояние, на которое сносится поплавок, изготовлен размеченная плавающая верёвка из полипропилена, разметка проведена каждые 10 см. На конце верёвки закреплён плавающий груз из пробкового дерева для того, чтобы верёвка растягивалась по течению.

Скорость всплытия пузырька воздуха в водной среде зависит от размеров и формы частицы. Наиболее подходящей формой пузыря для измерения скорости потока будет является сферическая форма, так как движение таких пузырьков воздуха является прямолинейным. Для регулирования размера поплавка и его формы в конструкции предусмотрен клапан на окончании воздушного трубопровода. Клапан представляется собой Г-образный краник для аквариума с регулировкой.

Так как на практике воздушный насос оказался избыточен для системы, была введена регулировка давления с помощью отсечного крана в начале силиконовой трубки. Клапан предназначен для сброса избыточного давления воздуха, которое возникает в системе.

Трубопровод соединён с насосом с помощью твёрдого переходника.

Конструкция и элементы прибора представлены в приложении 2.

3.3 Лабораторные и полевые эксперименты

Для проверки работоспособности прибора были проведены 2 серии лабораторных экспериментов в лаборатории Водных исследований кафедры Водно-технических изысканий РГГМУ. Также проведён полевой опыт с целью проверки удобства использования прибора.

3.3.1 1-я серия

Эксперименты производились в широком лотке при скоростях от 0,07 м/с до 0,20 м/с, глубина на вертикали варьировалась от 0,11 м до 0,33 м. Результаты измерений сравнивались с данными гидрометрической вертушки (микровертушка ГМЦМ-1). Измерения скорости потока в лотке производились на одной скоростной вертикали. При измерении с помощью вертушки использовался основной метод измерения скорости на вертикали. Результаты опытов приведены в Таблица 1. Работа макета прибора представлена на Рисунок 19



Рисунок 19. Макет прибора в широком лотке

Таблица 1. Результаты 1-й серии экспериментов с макетом прибора

№	h, м	l, м	V, м/с по макету прибора	V, м/с по вертушке	Отклонение, %
1	0,15	0,080	0,18	0,15	24,5
2	0,11	0,070	0,23	0,20	13,9
3	0,24	0,070	0,10	0,081	22,9
4	0,21	0,080	0,13	0,095	41,1
5	0,33	0,090	0,093	0,066	42,1

По результатам видно, что значения скорости потока, измеренные макетом прибора схожи со значениями скоростей, измеренными с помощью гидрометрической вертушки. Максимальное отклонение от скорости по вертушке в серии опытов составила 42,1%, а минимальное отклонение 13,9%.

3.3.2 2-я серия

Вторая серия экспериментов производилась в узком лотке при скоростях от 0,31 м/с до 0,43 м/с, глубина на вертикали варьировалась от 0,10 м до 0,12 м. Результаты измерений сравнивались с данными гидрометрической вертушки (микровертушка ГМЦМ-1). Измерения скорости потока в лотке производились на одной скоростной вертикали. При измерении с помощью

вертушки использовался основной метод измерения скорости на вертикали. Результаты опытов приведены в таблице 2.

№	h, м	l, м	V, м/с по макету прибора	V, м/с по вертушке	Отклонение, %
1	0,12	0,15	0,43	0,41	4,39
2	0,11	0,10	0,31	0,36	13,5
3	0,10	0,12	0,41	0,38	8,15

При анализе результатов измерений, выявлено отклонение измеренных скоростей по макету прибора от измеренных скоростей по вертушке в серии экспериментов составило от 4,39% до 13,5%, а абсолютные значения измеренных скоростей близки друг другу. Работа макета прибора представлена на Рисунок 20. Макет прибора в узком лотке.

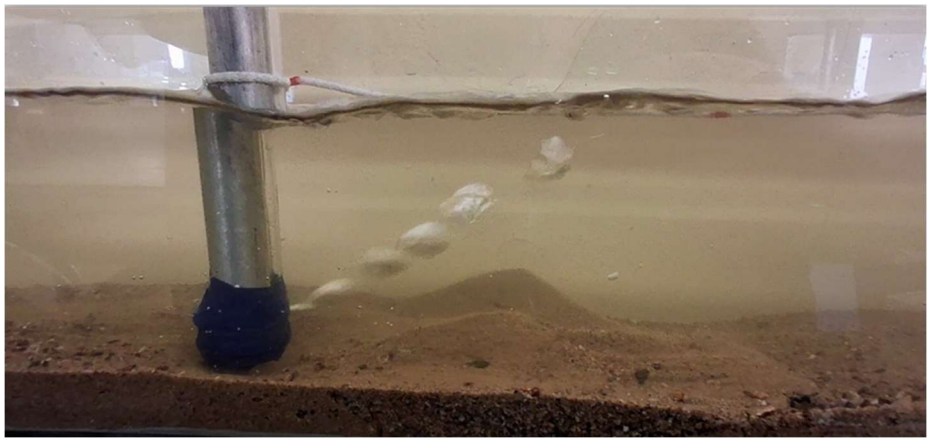


Рисунок 20. Макет прибора в узком лотке

3.3.3 Полевой эксперимент

Полевой эксперимент был проведён в безымянном оросительном канале в п. Александровская. В ходе измерений была установлена глубина 0,22 м и скорость потока равная 0,16 м/с. Сравнения с гидрометрической вертушкой не производилось (Рисунок 21).



Рисунок 21. Макет прибора в полевых условиях

В ходе полевого эксперимента установлено, что прибор удовлетворителен при использовании на практике.

3.4 Экономическое обоснование проекта

Данная выпускная квалификационная работа выполнена в формате «стартап как диплом», а проект макета прибора для измерения скорости потока в малых водотоках представлялся, как стартап в рамках акселерационной программы «Гидромет».

3.4.1 Потенциальные покупатели

К тем, кто будет закупать приборы относятся практически все организации, которые производят полевые гидрологические изыскания. К первоначальным покупателям, которым будет предоставлен прибор в первую очередь относятся:

1. Учебные заведения;
2. ГГИ;
3. ААНИИ;
4. Малые изыскательные организации.

В России находится около трёхсот компаний различных размеров, производящих гидрологические изыскания. Потенциально покупателями могут стать более крупные организации, имеющие в своей структуре

изыскательные подразделения, такие как Росгидромет, Газпром, Роснефть и др.

3.4.2 Рынок приборов

При оценке любого стартапа одним из важных факторов, которые нужно оценить в первую очередь является рынок. Для оценки рынка были проанализированы запросы в поисковике «Яндекс» на тему заинтересованности предполагаемых покупателей в гидрометрических приборах (Таблица 2).

Таблица 2. Запросы в поисковой системе «Яндекс» с 02.05.2026 по 31.05.2026

№	Запрос	Количество
1	расходомер	122 865
2	водомер	39 174
3	гидроприбор	2 599
4	профилограф	1 306
5	гидрометрическая вертушка	404
6	профилограф течения	106
7	измерение скорости потока воды	98
8	профилограф купить	85
9	доплеровский профилограф течений	80
10	измеритель скорости потока воды	63
11	прибор для измерения скорости потока воды	51
12	дистанционные расходомеры	37
13	гидрометрические приборы	32
14	вертушка гидрометрическая гр 21м	32
15	гидрометрическая вертушка исвп гр 21м1	31
16	гидрометрическая вертушка купить	26
17	вертушка гидрометрическая исп 1м	14
Суммарно		167 003

Анализируя таблицу видно, что за май 2026 года произведено 167 003 запроса на тему измерения скорости потока. Соответственно на рынке гидрологических приборов присутствует заинтересованность в инструментах для измерения скорости потока.

Следует отметить, что гидрологические изыскания являются узкоспециализированными, из-за чего рынок приборов для проведения полевых работ является сам по себе не большим.

3.4.3 Экономическая модель стартапа

В экономической модели стартапа смоделированы возможные расходы, прибыль и окупаемость проекта с учётом потенциальных продаж и всех издержек на разработку, запуск и функционирование проекта.

На разработку прибора, при учёте стоимости всех компонентов, которые были получены для исследований бесплатно, было потрачено 22 600 рублей. Итоговая себестоимость компонентов одного прибора составляет 11 230 рублей (Таблица 3).

Таблица 3. Себестоимость компонентов макета прибора

№	Наименование	Стоимость, руб.
1	Гидрометрическая рейка Гр-104	7 200
2	Клапаны и преходники	1 730
3	Насос	2 200
4	Силиконовая трубка	100
Итого, руб.		11 230

Подробная финансовая модель стартапа макета прибора для измерения скорости потока в малых водотоках представлена в приложении 3. Предполагаемая прибыль составляет 1 647 902 рублей за первый год при соответствии количества проданных приборов. Графически финансовая модель представлена на Рисунок 22. График финансовой модели стартапа

По графику видно, что стартап окупается уже в третьем месяце. Минимальное количество продаж, которое нужно для того, чтобы в течение

года стартап окупился, составляет 8 приборов в месяц, за год это 96 приборов при стоимости продажи прибора 24 706 рублей.

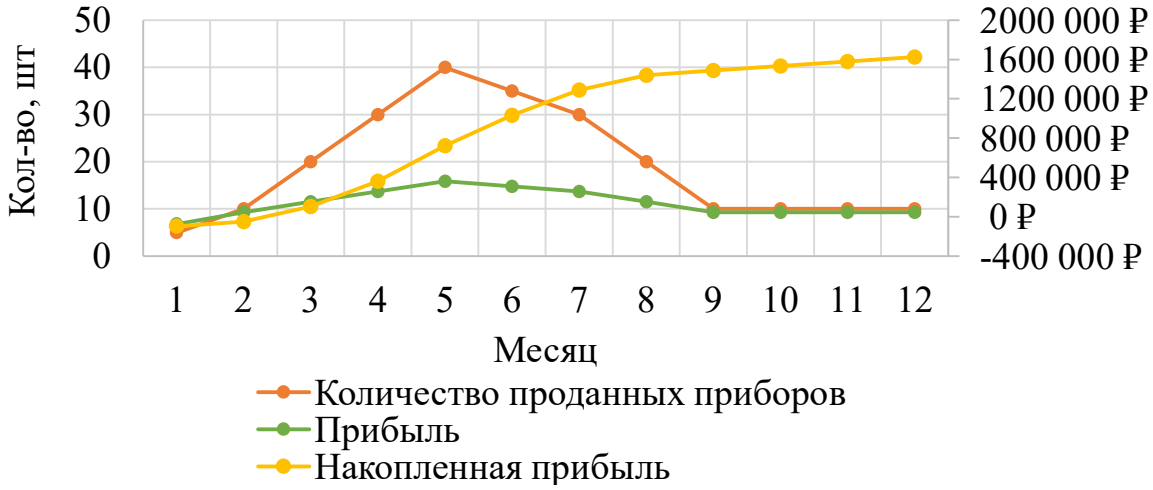


Рисунок 22. График финансовой модели стартапа

3.4.4 Приборы-конкуренты

Для настоящего проекта основными конкурентами на рынке приборов для измерения скорости течения являются:

- Поплавки;
- Гидрометрические вертушки;
- Ультразвуковые приборы (бесконтактные расходомеры и профилографы);

Это три основных прибора, которыми измеряют скорость потока в настоящее время. Так как профилографы практически не применимы в малых водотоках, то и сравнивать его с макетом прибора для измерения скорости потока в малых водотоках не следует.

Поплавки, как наиболее простой инструмент для измерения скорости потока, имеют одно основное преимущество перед другими приборам: они могут быть сделаны из подручных средств, с помощью которых предельно просто измерить скорость потока. Но поплавки, как упоминалось ранее, являются неточным инструментом для измерения скорости потока. В связи с этим у макета прибора есть в этом преимущество.

Бесконтактные расходомеры же являются стационарным прибором для измерения расхода методом «скорость-площадь», в чём и заключается его

основное отличие от макета прибора, который предназначен в первую очередь для полевых изысканий.

Основным конкурентом среди приборов для измерения скорости потока является гидрометрическая вертушка. В сравнении с вертушкой, как выяснилось на практике, измерения с помощью макета прибора производятся быстрее. Однако, у макета прибора есть преимущество перед гидрометрической вертушкой – стоимость. Макет прибора с учётом стоимости продажи является более дешёвым, чем гидрометрическая вертушка. Стоимость ГР-21М, как основного прибора для измерения скорости потока вертушечным методом, составляет от 178 000 рублей до 192 000 рублей в то время, как стоимость макета составляет всего лишь 24 706 рублей.

5. Вывод

В данной выпускной квалификационной работе был произведено сравнение методов измерения скоростей потока и выявлено, что различные методы измерения скорости потока применяются в разных условия в зависимости от характеристик водотока и технического задания. В ходе сравнения рассмотрены приборы для измерения скоростей потока, использующие различные методы измерения.

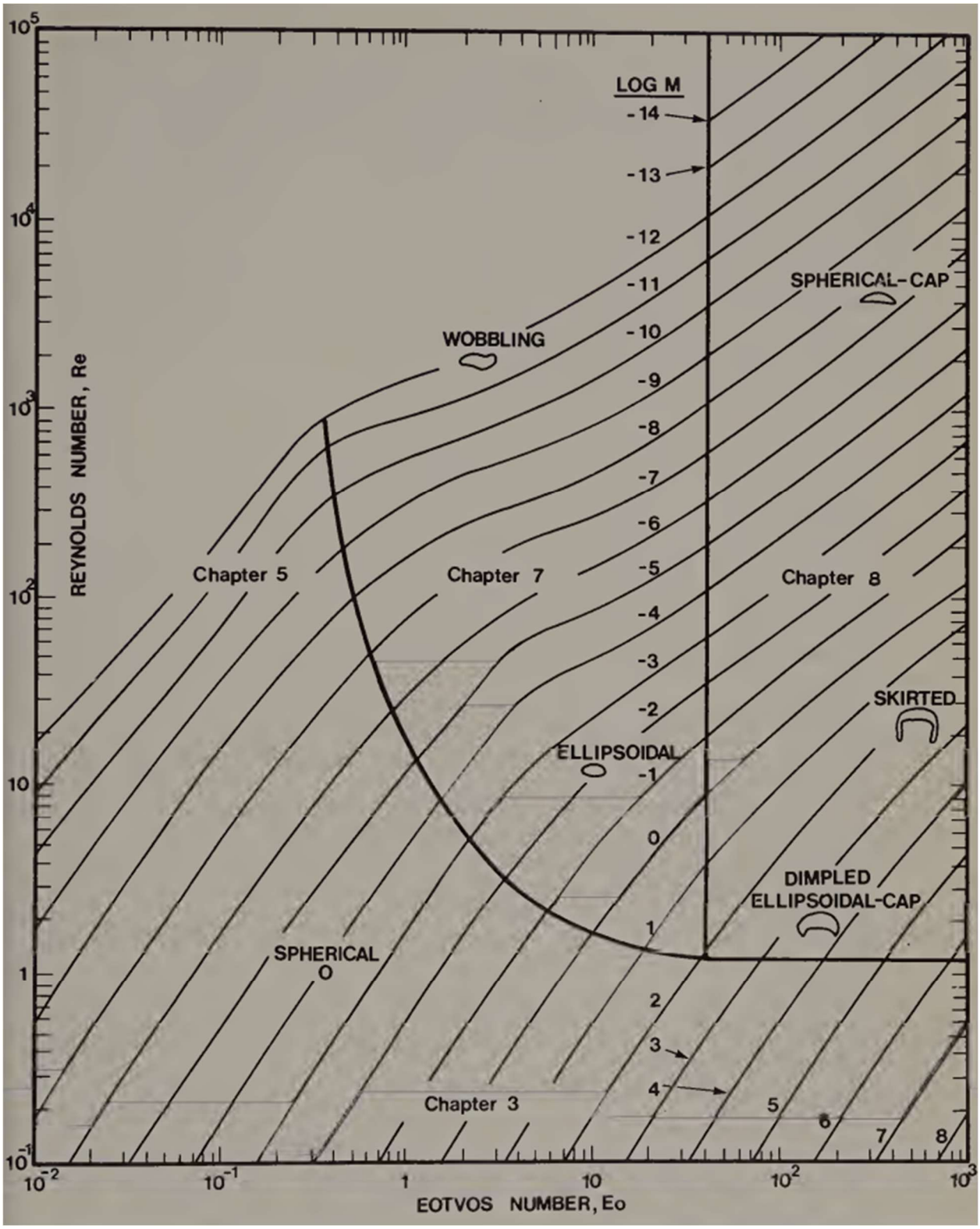
Также спроектирован, собран и апробирован новый прибор для измерения скорости потока в малых водотоках. Произведено сравнение с гидрометрической вертушкой, в ходе которого выявлено, что макет прибора жизнеспособен и может быть применён на практике. С помощью макета прибора возможно измерять уровень до 100 см и скорость потока в широком диапазоне. Прибор также может стать основой для стартап-проекта с хорошей прибылью.

6. Список литературы

1. Карасев, И. Ф. Гидрометрия : учебник / И. Ф. Карасев, И. Г. Шумков.– Л. : Гидрометеоиздат, 1985. – 380 с.
2. Карасев, И. Ф. Речная гидрометрия и учет водных ресурсов : учебник / И. Ф. Карасев. – Л. : Гидрометеоиздат, 1980. – 310 с.
3. Патент 81678 Союз Советских Социалистических Республик, Способ замера скорости руслового потока поплавком–интегратором и устройство для осуществления способа : №393378 ; заявл. 11.03.1949 / Глубшев К. С. – 4 с.
4. Гириллович Н. А., Гидрометрия : учебник // Ленинград, Москва, СССР: ОНТИ, НКТП, Главная редакция строительной литературы, 1937. – 328 с.
5. Рекомендации, 52.08.930 - 2023, Измерение расхода воды методами ионного паводка и постоянного пуска солевого раствора / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). – Санкт–Петербург : ГГИ, 2023. – 84 с.
6. Методические указания к лабораторной работе № 2 по дисциплине Основы проектирования приборов и систем» на тему «Построение схемы и моделирование работы ультразвукового доплеровского датчика расхода». — Уфа : Уфимский гос. авиационный технический ун-т, 2012. — 26 с.
7. Меньшиков, С. В. Курсовой проект по дисциплине “Первичные измерительные преобразователи ИИС” на тему “Конструкция и схема применения датчика температуры для измерения скорости потока жидкости или газа ” / С. В. Меньшиков, В. Б. Яржембицкий. — Минск : Белорусская гос. политехническая акад., 1997. — 43 с.
8. Железняков, Г. В. Теория гидрометрии / Г. В. Железняков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Гидрометеоиздат, 1976. – 344 с.
9. Быков, В. Д. Гидрометрия / В. Д. Быков, А. В. Васильев. — 3-е издан., перераб. и доп. — Л. : Гидрометиздат, 1972. — 452 с.

10. Васильченко, А. П. Ультразвуковые методы и приборы для измерения расхода воды на гидромелиоративных системах / А. П. Васильченко, А. М. Кореновский. // Экология и водное хозяйство. — Новочеркасск : Российский науч. ин-т проблем мелиорации, 2020. — С. 135–149.
11. Исаев, Д. И. Измерение расхода воды профилографом / Д. И. Исаев, Ванченко С. И., Ванченко В. // «Реки, озёра и моря Северо-Запада России в географической терминологии и лексике русских говоров» Электронный иллюстрированный словарь : [сайт]. — URL: http://aqua-thesaurus-rshu.ru/izmerenie-rashoda-vody-profilografom (дата обращения: 27.05.2026).
12. Скорость и расход. // datchiki.com : [сайт]. — URL: https://datchiki.com/catalog/oborudovanie-dlya-gidrologii/skorost-i-rashod/ (дата обращения: 27.05.2026).
13. Измерители скорости водного потока Посейдон-1. // pover.ru : [сайт]. — URL: https://www.pover.ru/spravochnik-sredstv-izmerenij/54706-13-izmeriteli-skorosti-vodnogo-potoka-poseydon-1/ (дата обращения: 27.05.2026).
14. Клименко, Д. Е. Развитие гидрометрических вертушек в России и за рубежом / Д. Е. Клименко. // Географический вестник. — 2010. — № 2. — 13 с.
15. Clift, R. Bubbles, Drops, and Particles / R. Clift, J. R. Grace, M. E. Weber. — New York, San Francisco, London : ACADEMIC PRESS, 1978. — 408 с.
16. Grace, J. R. Shapes and velocities of single drops and bubbles moving freely through immiscible liquids. / J. R. Grace. // Transactions of the Institution of Chemical Engineers. — 1973.
17. Архипов, В. А. Динамика всплытия пузырька в присутствии поверхностно-активных веществ / В. А. Архипов, И. М. Васенин, А. С. Усанина. // Известия РАН. Механика жидкости и газа. — 2016. — № 2. — С. 142-151.
18. Архипов, В. А. Динамика всплытия кластера пузырьков в присутствии поверхностно-активных веществ / В. А. Архипов, А. С. Усанина, С. А. Басалаев. // Известия РАН. Механика жидкости и газа. — 2020. — № 1. — С. 3-8.

Приложение 1. Режимы формирования формы частицы жидкости



Приложение 2. Конструкция макета прибора



Приложение 3. Финансовая модель стартапа макета прибора для измерения скорости потока в малых водотоках

№	Статья расходов / доходов	1 мес.	2 мес	3 мес.	4 мес.	5 мес.	6 мес.	7 мес.	8 мес.	9 мес.	10 мес.	11 мес.	12 мес.	Итого за год:
ПОСТОЯННЫЕ РАСХОДЫ														
1	Расходы на аутсорсинг	7 000	7 000	7 000	7 000	7 000	7 000	7 000	7 000	7 000	7 000	7 000	7 000	84 000
2	аренда гаража	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	10 000	120 000
3	набор инструментов	10 000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10 000
4	Рекламное продвижение	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	60 000
5	формирование запаса комплектующих	56 150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56 150
ИТОГО ПОСТОЯННЫЕ РАСХОДЫ		88 150	22 000	22 000	22 000	22 000	22 000	22 000	22 000	22 000	22 000	22 000	22 000	330 150
ПЕРЕМЕННЫЕ РАСХОДЫ														
1	Налоги на прибыль	7 412	14 824	29 647	44 471	59 294	51 883	44 471	29 647	14 824	14 824	14 824	14 824	340 943
2	Заработная плата работнику	5 615	11 230	22 460	33 690	44 920	39 305	33 690	22 460	11 230	11 230	11 230	11 230	258 290
3	Материалы и комплектующие	56 150	112 300	224 600	336 900	449 200	393 050	336 900	224 600	112 300	112 300	112 300	112 300	2 582 900
4	Страховые взносы	1 685	3 369	6 738	10 107	13 476	11 792	10 107	6 738	3 369	3 369	3 369	3 369	77 487
5	диллерское вознаграждение	37 059	37 059	37 059	37 059	37 059	37 059	37 059	37 059	37 059	37 059	37 059	37 059	444 708
ИТОГО ПЕРЕМЕННЫЕ РАСХОДЫ		107 920	178 782	320 504	462 227	603 949	533 088	462 227	320 504	178 782	178 782	178 782	178 782	3 704 328
ИТОГО РАСХОДЫ		196 070	200 782	342 504	484 227	625 949	555 088	484 227	342 504	200 782	200 782	200 782	200 782	4 034 478
ОБЪЁМ ПРОИЗВОДСТВА														
1	Аэротахомер	5	10	20	30	40	35	30	20	10	10	10	10	230
2	Запас на склад	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	60
ДОХОДЫ														
1	Стоимость продукта	24 706	24 706	24 706	24 706	24 706	24 706	24 706	24 706	24 706	24 706	24 706	24 706	296 472
	Количество проданных приборов	5	10	20	30	40	35	30	20	10	10	10	10	230
ИТОГО ДОХОДЫ		123 530	247 060	494 120	741 180	988 240	864 710	741 180	494 120	247 060	247 060	247 060	247 060	5 682 380
ИТОГО ОБОРОТ		123 530	247 060	494 120	741 180	988 240	864 710	741 180	494 120	247 060	247 060	247 060	247 060	5 682 380
ПРИБЫЛЬ		-72 540	46 278	151 616	256 953	362 291	309 622	256 953	151 616	46 278	46 278	46 278	46 278	1 647 902
ПРИБЫЛЬ НАКОПЛЕННАЯ		-95 016	-48 738	102 878	359 831	722 122	1 031 744	1 288 697	1 440 313	1 486 591	1 532 869	1 579 148	1 625 426	