



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 Применение гидрометрических
трубок при лабораторных
исследованиях

Исполнитель Ванченко Валентин Михайлович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.г.н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Голосовская Вера Алексеевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

доцент, к.г.н.
(ученая степень, ученое звание)

(фамилия, имя, отчество)

«16» июня 2026г.

Санкт-Петербург
2026

Оглавление

Введение.....	2
1. Методы полевых измерений скоростей течения рек.....	4
1.1 Поплавки.....	4
1.2 Поплавки-интеграторы.....	7
1.3 Гидрометрические вертушки.....	8
1.4 Гидрометрические трубки	13
1.5 Современные методы	21
2. Модернизация гидрометрических трубок для лабораторных исследований	26
2.1 Актуальность проблемы.....	26
2.2 Технические решения измерения скорости течения с помощью гидрометрической трубки	27
2.2.1 Проведение эксперимента.....	30
2.2.2 Данные, полученные в ходе эксперимента	32
2.2.3 Анализ результатов лабораторного эксперимента.....	35
Заключение	37
Список использованных источников	38

Введение

Важнейшая задача лабораторных и полевых исследований в гидрологии – провести точные измерения основных параметров водного потока. К этим параметрам, в первую очередь, относится скорость водного потока. Данная характеристика играет важную роль в большом спектре научных и прикладных задач: начиная проектированием гидравлических сооружений и заканчивая экологическим мониторингом и моделированием природных процессов. В условиях лабораторий и испытательных полигонов большую роль играют надёжные и относительно простые измерительные устройства. Одно из ключевых мест среди таких устройств занимают гидрометрические трубки.

Гидрометрические трубки широко применяются для определения скорости потока жидкости, а также давления жидкости. Конструкция данных устройств не отличается большой сложностью, а процесс измерения динамического давления происходит напрямую, в связи с чем не требуется дополнительных шагов для интерпретации результатов. Однако точность результатов измерения зависит от большого числа факторов, таких как тип трубки, её ориентация в потоке жидкости, геометрии канала, турбулентности и вязкости жидкости.

За последние годы появились некоторые новые приборы для измерения. В то же время другие приборы получили модернизацию с использованием современных технологий. Исходя из сказанного выше, можно понять, что задача изучить гидрометрические трубки в условиях лабораторий и сравнить их с другими способами измерения параметров воды является актуальной.

В связи с этим возникает необходимость детального изучения эффективности применения гидрометрических трубок в лабораторных исследованиях, оценки точности полученных результатов и выявления ограничений.

Цель работы – изучить и оценить эффективность применения гидрометрических трубок для измерения параметров водных потоков при лабораторных исследованиях.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

Изучить историю возникновения гидрометрических трубок, выяснить конструктивные особенности и принцип работы различных типов данного агрегата.

Проанализировать другие существующие методики измерения параметров водного потока и сравнить их с измерениями, проводимыми с помощью трубок.

Рассмотреть возможные пути модернизации трубки и создать прототип прибора.

Провести серию лабораторных экспериментов по измерению скорости водного потока с помощью модернизированной гидрометрической трубки.

Оценить точность и погрешность измерений, сопоставив данные, полученные с помощью обновлённой трубки с расчётными значениями и результатами, полученными альтернативными методами.

Разобрать факторы, влияющие на достоверность измерений и предложить способы повышения точности измерений.

Объектом исследования являются гидрометрические трубки различных типов и модификаций.

Предмет исследования – параметры потока жидкости (скорость потока, расход воды, статическое и динамическое давление воды), измеряемые с помощью гидрометрических трубок в лабораторных условиях.

1. Методы полевых измерений скоростей течения рек.

Одна из важнейших характеристик любой реки – это скорость её течения. Зная скорость, мы можем как произвести расчёт расхода воды в реке, так и спрогнозировать паводки. Задача рассчитать скорость потока воды стояла перед человечеством с древних времён. За прошедшие тысячелетия было разработано несколько способов измерения скорости потока. Основную роль в данном исследовании играют гидрометрические вертушки. Однако для того, чтобы понять, насколько точно они позволяют измерить искомые характеристики, требуется проанализировать другие способы измерения скорости водного потока и использовать один из них в качестве эталона для сравнения результатов.

1.1 Поплавки

Использование поплавков является самым древним способом измерения скорости течения. Поплавком принято считать тело, которое свободно перемещается потоком. Суть метода элементарна: требуется запустить поплавок в реку и измерить два параметра: расстояние S , которое проплыл поплавок, а также время T , за которое он это сделал. Исходя из полученных данных, скорость получается по формуле:

$$V = \frac{S}{T}$$

Чаще всего в гидрометрии применяются поверхностные поплавки (Рис. 1 а), хотя существуют и их глубинные разновидности (Рис. 1 б). При измерениях скорости течения в качестве поплавков могут использоваться как подручные приметы (к примеру, хорошо заметные лист, ветка дерева или другой плавучий яркий объект), так и специально изготовленные для данной цели. Хорошо показали себя деревянные кружки диаметром в районе 30 см и толщиной 3-5 см с установленным на них ярким флажком для лучшей видимости. По некоторым наблюдениям, крестовины из поставленных на ребро досок в качестве поплавков лучше отражают движение поверхностного слоя воды. Также могут

использоваться частично наполненные водой бутылки и, в некоторых случаях, льдины и другие предметы, плывущие по реке.

Глубинные поплавки предназначены для измерения скорости течения на заданной глубине. Такие поплавки состоят из двух связанных нитью поплавков. Нижний поплавок значительно больше верхнего и представляет из себя сосуд, заполненный в большинстве случаев водой либо песком так, чтобы средняя плотность немного превышала плотность воды. Верхний поплавок при этом изготавливается из пробки либо пенопласта и используется для удержания нижнего на нужной для определения скорости глубине. Для уменьшения влияния на результаты измерения, верхний поплавок изготавливается насколько возможно лёгким.

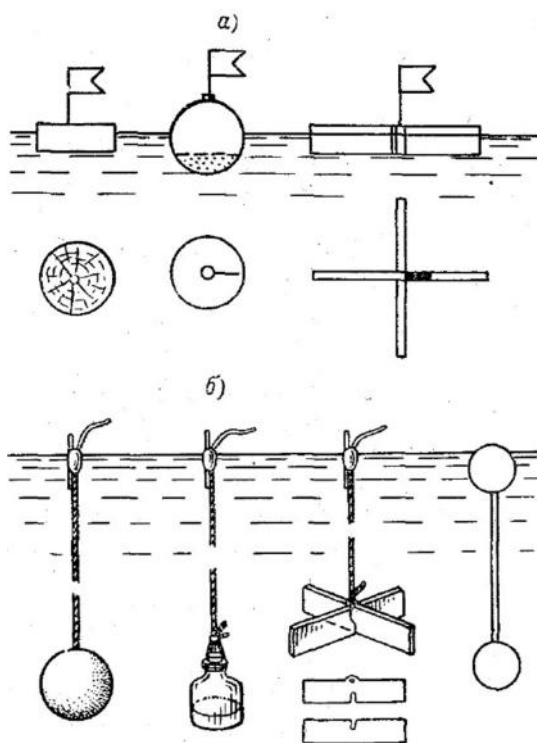


Рисунок 1. Гидрометрические поплавки: а – поверхностные, б –
глубинные

Использование поплавков является самым простым и дешёвым методом, который может использоваться и сейчас. Для того, чтобы провести измерения с помощью поплавков, требуется осуществить следующие шаги:

1. Выбрать участок. Для точности измерения требуется относительно прямой участок реки, так как в случае изгибающегося течения поплавок может сбиться с траектории.

2. Разметить створы. Требуется отметить несколько линий перпендикулярно течению. В большинстве случаев создают три створа: верхний, нижний и пусковой. Створы требуется закрепить: на узких реках чаще всего натягивают размеченный трос, в то время как на широких реках ставят вехи. Расстояние между створами также требуется зафиксировать.

3. Подготовить поправки. В настоящее время используются разные конструкции поплавков. Часто используют деревянные диски или крестовины, частично заполненные водой. Стоит учитывать, что поплавок должен быть хорошо виден для лёгкости отслеживания, а также чтобы он как можно меньше возвышался над водой. Это требуется для того, чтобы ветер как можно меньше оказывал влияние на точность измерения.

4. Провести замеры. Запуск поплавков производится последовательно, равномерно распределяя объекты по ширине реки. При этом зарослей у берегов стараются избегать. В момент прохождения поплавком верхнего створа начинается отслеживание времени до тех пор, пока поплавок не пересечёт нижний створ. В итоге для каждого полавка будет получено время, за которое он прошёл фиксированное расстояние между створами.

5. Обработать данные. Для каждого полавка производят расчёт скорости, после чего находят среднее значение скорости водного потока.

Несмотря на простоту, при измерениях стоит учитывать несколько нюансов. Можно заметить, что измерения могут подвергнуться сильному искажению в случае воздействия ветра. Поэтому следует применять данный способ в безветренную погоду.

Также стоит заметить, что с помощью поплавков можно получить только осреднённую скорость на участке траектории полавка, а не мгновенную в определённой точке.

В целом метод хорош для рекогносцировочных работ, разовых оценок или в ситуациях, когда другие приборы недоступны (например, при сильном ледоходе в качестве поплавков иногда используют отдельные льдины). Но для детальных исследований, где нужна высокая точность в конкретных точках, чаще выбирают другие инструменты.

1.2 Поплавки-интеграторы

В гидрометрии существует другой известный инструмент, получивший своё развитие из поплавков. Данный аксессуар называется поплавок-интегратор. Поплавки такого типа, в отличие от классических поплавков, осредняют скорость течения по всей глубине потока и, тем самым, позволяют получить значение средней скорости для всей скоростной вертикали. Это позволяет значительно сэкономить время во время изысканий, так как не требуется делать замеры на множестве точек на разной глубине, результат получается уже от одного запуска.

Чаще всего в качестве поплавка-интегратора используется лёгкий объект, плотность которого меньше, чем плотность воды. Примером такого поплавка может служить деревянный либо пенопластовый шарик, в редких случаях – воздушный пузырь либо масляная капля (Рис. 2).

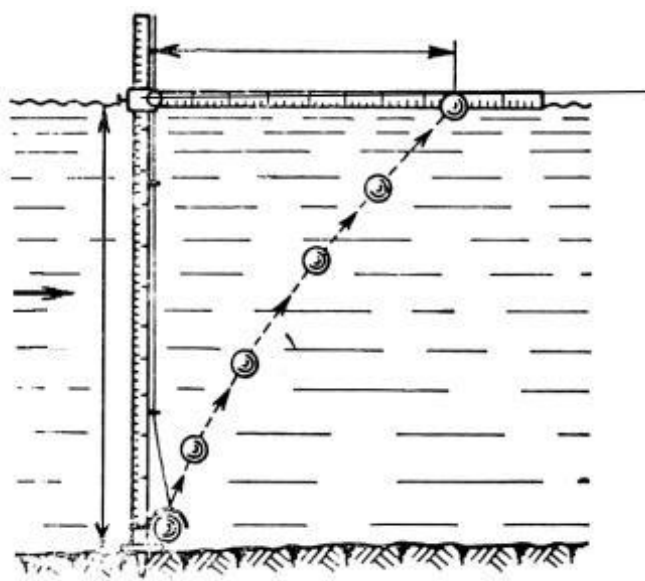


Рисунок 2. Поплавок-интегратор

Для измерения требуется:

1. Установить штангу с закреплённым к ней поплавком на дно реки.
2. В фиксированный момент времени освободить поплавок.
3. Поплавок начинает всплывать. В это время он проходит разные слои воды с различной скоростью течения.
4. В то же время идёт снос поплавка течением на расстояние L .
5. Зафиксировать время, за которое поплавок всплывёт на поверхность.

Для получения средней скорости на вертикали используют формулу:

$$\bar{V}_B = \frac{L}{t}$$

В некоторых случаях измерение времени не требуется. Это возможно в случае, если скорость всплытия поплавка w была измерена в стоячей воде. Тогда время возможно рассчитать, используя формулу

$$t = \frac{h}{w}$$

Где h – известная глубина по вертикали. Данный расчёт значительно упрощает полевые работы.

Чаще всего поплавки-интеграторы применяют при измерении малых скоростей течения, в которых гидрометрические вертушки дают ненадёжные результаты, либо при оперативном определении средней скорости на вертикали для быстрого расчёта расхода воды.

Данный метод, также как и метод поплавков, имеет достаточно большие погрешности – порядка 10% и более. Также в случае медленного всплытия, поплавков может пропустить крупные турбулентные образования, такие как вихри, зоны замедления и ускорения потока). В этом случае возрастает случайная погрешность: движение поплавка в таких условиях имеет более сильное отклонение, чем при статистическом осреднении.

1.3 Гидрометрические вертушки

Измерение скорости течения с помощью гидрометрической вертушки (Рис. 3) считается одним из наиболее точных полевых методов.

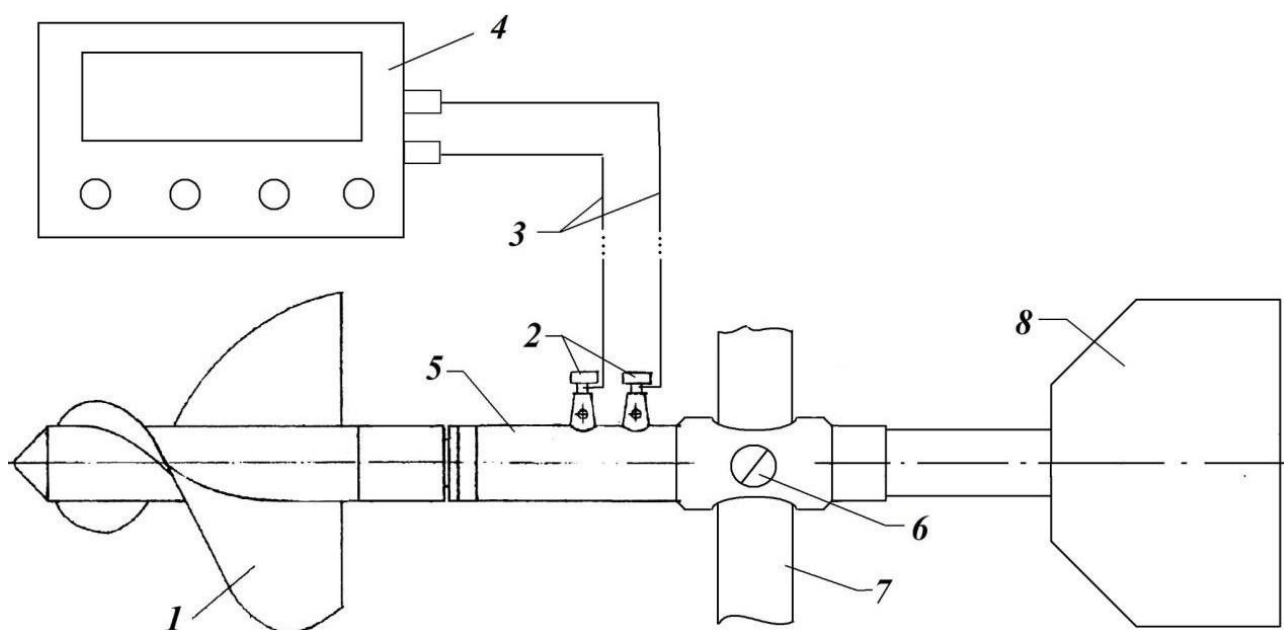


Рисунок 3. Схема гидрометрической вертушки (1 - лопастной винт; 2 - клеммы; 3 - сигнальный провод; 4 - преобразователь сигнала вертушки; 5 - корпус вертушки; 6 - стопорный винт; 7 - штанга; 8 – стабилизатор)

Первую гидрометрическую вертушку разработал немецкий гидротехник Рейнгард Вольтман в конце XVIII века для определения скорости течения реки Эльба. Данная вертушки 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. Конструкция оказалась удачной, в связи с чем метод измерения обрёл популярность. При этом конструкция прошла некоторые усовершенствования спустя время. Для повышения чувствительности и улучшения работы на малых глубинах была оптимизирована форма лопастного винта. Также от изначально механического способа регистрации оборотов перешли к электрическим сигналам.

Принцип измерения состоит в следующем: лопастной винт вертушки вращается под воздействием водного потока. Каждый полный оборот винта фиксируется специальным механизмом и преобразуется в электрический сигнал. Таким сигналом может быть звонок или вспышка лампочки. С помощью

секундомера измеряется время работы вертушки и подсчитывается число сигналов. Это число делят на время и получают число оборотов в секунду. Затем с помощью тарировочной кривой либо таблицы (Рис. 4) получают скорость течения данного водного потока.

Дата поверки 08.01.2008

Тип вертушки	ИСП-1
№ вертушки	0707
№ винта	0707
Диаметр винта	120

ИФП $V=an+b$	a	b
при n менее 0,701 об/с	0,1987	0,0144
при n от 0,701 об/с	0,2184	-0,0001

n , об/с	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1					0,042	0,044	0,046	0,048	0,050	0,052
0,2	0,054	0,056	0,058	0,060	0,062	0,064	0,066	0,068	0,070	0,072
0,3	0,074	0,076	0,078	0,080	0,082	0,084	0,086	0,088	0,090	0,092
0,4	0,093	0,095	0,097	0,099	0,101	0,103	0,105	0,107	0,109	0,111
...										
1,0	0,218	0,220	0,223	0,225	0,227	0,230	0,231	0,234	0,236	0,238
1,1	0,240	0,242	0,244	0,247	0,249	0,251	0,253	0,255	0,258	0,260
...										
2,0	0,437	0,439	0,441	0,443	0,445	0,448	0,450	0,452	0,454	0,456
2,1	0,458	0,461	0,463	0,465	0,467	0,469	0,472	0,474	0,476	0,478
...										
3,0	0,655	0,657	0,659	0,662	0,664	0,666	0,668	0,670	0,672	0,675
3,1	0,677	0,679	0,681	0,683	0,686	0,688	0,690	0,692	0,694	0,696
...										
4,0	0,873	0,876	0,878	0,880	0,882	0,884	0,886	0,889	0,891	0,893
4,1	0,895	0,897	0,900	0,901	0,904	0,906	0,908	0,910	0,913	0,915
...										
5,0	1,092	1,094	1,096	1,098	1,100	1,103	1,105	1,107	1,109	1,111
5,1	1,114	1,116	1,118	1,120	1,122	1,124	1,127	1,129	1,131	1,133
...										
6,0	1,310	1,312	1,314	1,317	1,319	1,321	1,323	1,325	1,328	1,330
6,1	1,332	1,334	1,336	1,338	1,341	1,343	1,345	1,347	1,349	1,352
...										
...										
11,4	2,489	2,491	2,494	2,496	2,498	2,500	2,502	2,505	2,507	2,509
11,5	2,511	2,513	2,515	2,518	2,520	2,522	2,524	2,526	2,529	2,530

Рисунок 4. Пример тарировочной таблицы

Тарировочную кривую определяют для каждой вертушки индивидуально с помощью специального бассейна. В данном бассейне известны скорости потока и, поместив в него вертушку, можно построить зависимость числа оборотов лопастного винта от скорости течения.

На практике для проведения измерений требуется осуществить следующие шаги:

1. Подготовить инструмент. Перед началом измерений требуется проверить исправность вертушки. Для этого необходимо разобрать её: раскрутить винт, убедиться в плавности его вращения, удостовериться, что цепь работает и сигнальное устройство правильно передаёт информацию о числе пройденных оборотов. Кроме того, стоит иметь при себе тарировочное свидетельство для конкретной модели прибора.
2. Выбрать точки. Измерения производятся на так называемых скоростных вертикалях – линиях, проведённых в поперечном сечении водотока. На каждой вертикали скорость замеряют в нескольких точках по глубине. Часто используют такие отметки: у поверхности, на $0,2h$, $0,6h$, $0,8h$ и у дна (где h — глубина на вертикали). При наличии ледяного покрова или при зарастании русла принято добавить ещё одну точку: обычно это $0,4h$.
3. Установить прибор. Способ установки зависит от глубины потока. При малых глубинах (до 3 метров) вертушку крепят на штангу. Штангу упирают в дно, а вертушку фиксируют на определённой глубине. В случае, если глубина больше, обычно используют трос с грузом и лебёдку. Следует обратить внимание на ориентацию вертушки: она должна быть развёрнута против течения. Во избежание помех требуется, чтобы лопасти винта находились на расстоянии 2-3 см от поверхности воды либо от дна.
4. Провести измерения. После установки стоит пропустить 1-2 сигнала, после чего включить секундомер. Затем требуется считать все последующие сигналы. Рекомендуется проводить измерения в каждой точке не менее 100 секунд. Это необходимо для сглаживания пульсаций потока и получения более надёжного результата.
5. Вычислить скорость. Полученное количество сигналов умножают на число оборотов, которое соответствует одному сигналу для данной модели вертушки, получая тем самым общее число оборотов. Это значение делят на время, за которое происходило измерение, получая

количество оборотов в секунду. Имея это число, с помощью тарифовочного свидетельства находят соответствующую скорость течения для данной точки.

6. Обработать результаты. После замеров на всех точках каждой вертикали вычисляем среднюю скорость водного потока. Полученные значения можно использовать для построения скоростной эпюры промерной вертикали, а также на основе совокупности данных можно построить годограф скоростей.

В гидрометрии кроме классических вертушек также применяются микровертушки, которые имеют гораздо меньший размер и диаметр лопастного винта. Они подходят для проведения измерений в узких створах, на малых реках, а также в лотках и лабораторных установках, где обычная вертушка может создавать большие возмущения в потоке, либо не поместится в поток из-за своих габаритов.

Регистрация сигнала у таких небольших приборах также отличается – исследователь сразу получает цифровой результат, так как сердцем такой вертушки является небольшой цифровой блок. Данный блок осуществляет подсчёт импульсов и, автоматически используя тарифовочные коэффициенты, осредняет скорость за заданное время. Современные модели в большом количестве случаев обладают памятью и интерфейсом для передачи данных на компьютеры либо смартфоны для их дальнейшей обработки.

Микровертушки, в отличие от своих больших собратьев, адаптированы для измерения малых скоростей, что играет большую роль при лабораторных исследованиях и учёте воды в слабом течении. При обработке результатов они используют кусочно-линейную аппроксимацию: для разных диапазонов скоростей применяют разные тарифовочные уравнения с индивидуальными коэффициентами для каждого винта. Это снижает погрешность в широком диапазоне. Кроме того, автоматическое осреднение уменьшает влияние случайных колебаний. Однако размер прибора оказывается одним из его больших недостатков. Микровертушка очень хрупкая и требует крайне

аккуратного обращения и регулярной проверки с обновлением тарифовочных коэффициентов. На её работоспособность оказывают большое влияние перепады температур, грязь и песок, в то время как обычная вертушка практически не обращает внимания на их воздействие.

При проведении измерений стоит учесть несколько моментов. Так, гидрометрические вертушки непригодны для измерений на потоках с крайне малыми скоростями, так как у каждой вертушки имеется начальная скорость – минимальная скорость водного потока, при которой винт начинает вращение. Нельзя также забывать о таких факторах водного потока, как его турбулентность, наличие взвешенных частиц или льда, а также о том, какое влияние на результат оказывает неправильная ориентация прибора.

Погрешность измерения скорости с помощью вертушки обычно составляет от 1 до 3%.

1.4 Гидрометрические трубки

Гидрометрические трубки – это надёжные инструменты, которые используются для измерения скорости течения воды. Этого удаётся достичь благодаря перепаду давлений – разнице между полным напорным и статическим давлением.

Данные приборы имеют простую конструкцию и не требуют особых знаний, необходимых для их обслуживания. В стационарных условиях они обладают хорошей точностью и позволяют быстро получить результат. С их помощью можно выяснить местную скорость в любой точке потока.

Первая гидрометрическая трубка была изобретена французским инженером-гидротехником Анри Пито в 1732 году. Данный прибор имел простейшую конструкцию и представлял собой трубку Г-образной формы, в которой один конец был направлен навстречу потоку, в то время как другой был выведен наружу. В вертикальной части происходит подъём жидкости на высоту, соответствующую полному давлению в потоке. Данная конструкция позволяла

получить только полное давление, в связи с чем для измерения скорости требовалось отдельно получать статическое давление.

В конце XVIII века итальянский учёный Джованни Батиста Вентури расширил теоретическую базу. Им был открыт эффект Вентури, который заключается в увеличении скорости и падении давления в момент, когда поток жидкости протекает через более узкую часть трубы. Созданные на основе данного эффекта трубки не являются модификациями трубки Пито, однако также позволяли вычислить скорость водного потока на основе разности давлений потока до и после сужения трубки, а также геометрии этого сужения.

В дальнейшем происходит усовершенствование первоначальной конструкции. В 1858 году французский учёный Генри Дарси существенно модернизирует трубку Пито: именно он смог чётко разделить и измерить полное и статическое давления. Именно доработки Дарси позволили на практике применять прибор для измерения скорости потока.

Трубка Пито-Дарси позволяет измерить скоростной напор через перепад давления. Если подобную трубку поместить в воду таким образом, чтобы одно её колено было горизонтально и направлено против течения, в то время как другое было бы вертикально, то уровень воды в вертикальном колене будет выше, чем уровень воды в реке. То же время вес столбика воды высотой h в вертикальном колене будет уравнивать давление текущей воды. В случае идеальных условий, когда погружённая в идеальную жидкость трубка никак не оказывает влияния на движение потока, имело бы место равенство:

$$h = \frac{V^2}{2g},$$

где V – скорость водного потока, g – ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$. В таком случае скорость определялась бы по формуле:

$$V = \sqrt{2gh}.$$

Для действительных условий приходится вводить поправочный коэффициент K . В этом случае имеем:

$$V = K \cdot \sqrt{2gh}$$

Коэффициент K индивидуален для каждой трубки и должен быть определён с помощью тарировки прибора.

Среди модификаций трубки Пито, сделанных Дарси, наибольшую известность получили такие две разновидности трубок, как большая стационарная трубка Пито-Дарси и карманная трубка.

Большая стационарная трубка Пито-Дарси представляет из себя конструкцию из двух стеклянных трубок, укреплённых на деревянной доске с нанесённой шкалой. Обе эти трубки внизу переходят в медные, изогнутые под углом трубки. При этом отверстие одной направлено против течения, в то время как у второй оно направлено на плоскость, перпендикулярную плоскости первой трубки, в связи с чем оказывается не под влиянием речного течения. Доска прикреплена к штанге, благодаря чему её можно опускать в реку. Также в месте перехода стеклянных трубок в медные имеется кран, открывающий и закрывающий одновременно обе трубки.

Когда прибор погружён в воду и кран открыт, вода в одной из трубок под действием скоростного напора поднимается в одной из трубок выше, чем в другой. Верхние концы двух трубок входят в общую обойму, с которой с помощью крана соединяется резиновая трубка, оканчивающаяся раструбом. Используя раструб, можно для удобства снятия данных, поднять воду в обеих трубках одновременно на одинаковую высоту и закрыть кран в обойме. После всех проделанных действий требуется снять с трубок значение уровней воды с помощью шкалы на доске. Получившиеся отсчёты (h_1 и h_2) позволяют рассчитать скорость на глубине погружения трубки:

$$V = K \cdot \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

Стоит упомянуть, что в ситуации, когда трубка погружена в воду настолько, что становится невозможно снять отсчёты по шкале, требуется вдуть внутрь трубки воздух через раструб и целиком вынуть прибор из воды. При этом прибор должен хотя бы одну минуту побыть в воде, прежде чем можно снять с него отсчёт. Величина коэффициента K зависит от конструкции прибора:

соотношения между диаметрами входных отверстий и стеклянных трубок, материалов вводных трубок. Среднее значение коэффициента K составляет 1,02.

Карманная трубка Пито-Дарси состоит из лёгких полых металлических штанг. Верхнее колено является обоймой для водяного манометра, в то время как на нижнее колено навинчиваются скомбинированные в одно целое приёмники вместе с направляющим их навстречу течению рулём. Отверстие в приёмной трубке располагается на продолжении плоскости руля, в то время как во второй приёмной трубке оно располагается сбоку и прикрыто металлической гильзой. Манометр представляет из себя две стеклянные трубочки, укреплённые на деревянной шкале, верхние концы которых соединяются вместе с помощью резинового рукава. От этого соединения также предусмотрен отросток, имеющий зажим для вдувания либо выдувания воздуха, аналогично большой стационарной трубке Пито-Дарси. Манометр соединяется с мундштуками приёмников при помощи резиновых трубок.

При разрядке воздуха в манометре после установки прибора, производится подъём уровня воды до трубок манометра. С помощью шкалы возле этих трубок и производятся отсчёты.

Эта модификация использует приёмники, расположенные в горизонтальной плоскости. Эти приёмники позволяют измерять скорость течения в протоках, глубина которых позволяет полностью покрыть приёмники водой.

Для случаев, когда измерение скоростного напора производится с помощью троса, была создана модификация трубки под названием трубка Риттера. Такую трубку не требуется держать в руках, а опускают в поток на тросе и фиксируют. Такая конструкция позволяет измерять скорость течения в разных точках реки на разной глубине и в разных сечениях, перемещая прибор вдоль троса.

Погружение обеспечивается наличием тяжёлых гирь, в то время как ориентация относительно течения — с помощью руля. Принцип измерения скорости такой же, как и в классической трубке Пито-Дарси. Такая конструкция

решает практическую задачу: при исследованиях водотоков часто нужно промерить поток по всей глубине или вдоль русла. С трубкой на тросе исследователь может опускать её с лодки или моста, фиксировать показания в разных точках и строить карту скоростей. Это удобнее, чем постоянно держать трубку в руке, особенно на течении или в беспокойной воде.

Одной из интересных модификаций того времени является трубка Пито конструкции Амслера. Она предназначена для измерения скорости потока в условиях, где классическая конструкция трубки оказывает слишком большое влияние на поток, к примеру, из-за близости стенок, либо из-за наличия завихрений. В данной модификации измерение как динамического, так и статического давления, происходят в одной и той же точке потока разными каналами внутри конструкции. Прибор имеет трубку с двумя отдельными внутренними каналами: один ведёт к отверстию, направленному навстречу потоку и измеряет динамическое давление, второй же направлен к ряду боковых отверстий, которые позволяют снять статическое давление в той же локальной зоне, при этом нивелируя возмущения потока от носика трубки. Такие модификации особенно ценны в сложных потоках: в каналах с турбулентностью, в местах рядом с препятствиями, в вентиляционных системах или при исследованиях в аэродинамических трубах, где важно точно «поймать» локальную скорость, не искажённую соседними факторами. Важная деталь: перед проведением измерений требуется убедиться, что внутренние трубки не содержат воздуха. Для этого в стоячей воде закачивают воду во внутренние трубки примерно на половину высоты прибора. При этом не должно происходить подъёма воздушных пузырей, а уровни в обеих трубках должны находиться на одной высоте

В конце XIX века немецкий гидродинамик Людвиг Прандтль объединил классическую трубку Пито с напорной трубкой для измерения статического давления потока (Рис. 5). Центральная (внутренняя) часть с торцевым отверстием используется для измерения полного давления. Наружная внешняя часть имеет кольцевые боковые отверстия, которые направлены

перпендикулярно потоку и используются для нахождения статического давления. Полученная разница давлений сразу подавалась на манометр, что позволило устранить главный недостаток трубки Пито и избавило исследователей от необходимости проводить дополнительные измерения.

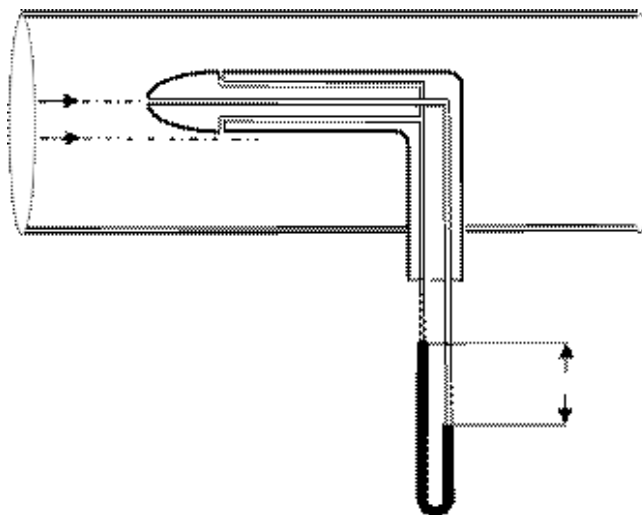


Рисунок 5. Схема гидрометрической трубки Пито-Прандтля

В конце XIX – начале XX века, в период активного развития экспериментальной гидродинамики появилось большое количество модификаций данного прибора. Эти модификации требовались для проведения измерений в специфических средах, либо с особыми условиями.

Так, трубка Брабе, разработанная французским инженером Анри Брабе, использовалась для измерения скорости потока в условиях повышенной турбулентности и при малых скоростях. Брабе оптимизировал форму носика, чтобы снизить чувствительность к углу атаки потока, что позволило увеличить точность измерений в сложных условиях.

Трубка Лосиевского пригодна для точного измерения скоростей в потоках с большими вертикальными градиентами скорости. Она позволяет детально изучить вертикальный скоростной профиль с помощью нескольких рядов боковых отверстий, расположенных на разных уровнях, что позволяет измерить скоростной градиент.

Такая модификация, как трубка Престона (другое название – трубка Стантона), позволяет измерить скорости в тонком пограничном слое у твёрдых

поверхностей, где другие трубки дают большие погрешности. Эта трубка имеет плоскую либо клиновидную форму, что необходимо для минимизации возмущений потока. Приёмное отверстие такой трубки расположено крайне близко к поверхности и имеет миниатюрные размеры. Для пересчёта динамического давления в скорость потока используется калибровочная кривая Престона.

С середины XX века в гидрологии используется модификация трубки Пито-Прандтля, известная, как трубка типа Рибо. Конструкционно она представляет собой заострённый стальной или латунный зонд с углом конусности 15 – 20, что позволяет снизить турбулентность. Приспособление имеет центральное отверстие диаметром 1-2 мм для измерения полного напора и несколько боковых щелей шириной 0,5 мм для статического давления. Данный аппарат предназначен для точных измерений низких скоростей потока в лабораторных условиях. Используется трубка в основном для открытых каналов и моделей рек. С её помощью удаётся построить вертикальные профили скорости (с шагом 5-10 сантиметров по глубине) в гидравлических лотках шириной 0,2 – 1 м. Данная разновидность позволяет измерить скорости от 0,05 до 1,5 м/с с погрешностью 3-5%. Это подходит для изучения пограничного слоя и гидравлического сопротивления.

Порядок проведения измерений:

1. Подготовка прибора. Требуется проверить исправность трубки и соединительных шлангов, а также установить глубину погружения, точку измерения и нулевую отметку на измерительном приборе.
2. Установка аппарата. Погрузить трубку в поток центральным отверстием строго навстречу течению. Зафиксировать её на заданной глубине и обеспечить устойчивое положение трубки, то есть минимизировать колебания.
3. Снятие показаний. Необходимо зарегистрировать разность уровней жидкости либо давлений в каналах полного и статического давления. Прежде чем снимать отсчёт, рекомендуется подождать 10-30 секунд до

стабилизации уровня. При сильной турбулентности предписывается выполнить серию измерений и взять среднее значение.

4. Расчёт характеристик. Вычислить скоростной напор и на основании полученных данных получить значение скорости.
5. Оценка качества. Следует сравнить результаты с данными, полученными другим способом, к примеру, вертушкой. Кроме того, нужно проверить, насколько профиль скоростей соответствует типичному для данного типа водотока.

Измерение скорости водного потока с помощью гидрометрической вертушки обладает рядом ограничений и погрешностей. Данные измерения очень чувствительны по отношению к тому, под каким углом установлено оборудование. При отклонении на 10° имеется большая погрешность. Из-за малого диаметра отверстий в мутной или загрязнённой воде трубки могут засориться. Измерения также практически невозможны для потоков с очень малыми скоростями, так как в таком случае разность высот в трубках очень мала, в связи с чем при снятии результатов происходят большие искажения. Гидрометрические трубки плохо предназначены для измерения скорости на больших глубинах. Также некоторые трудности вызывает тарировка гидрометрических трубок.

При этом основная часть инструмента практически не подвержена изнашиванию, что облегчает тарировку. Также достоинством гидрометрических трубок является отсутствие необходимости измерения времени при проведении замеров.

В связи с вышесказанным, гидрометрические трубки достаточно часто используются для измерения скоростей в лабораторных условиях вблизи ко дну и стенкам потока. Данные измерения затруднительно выполнить с помощью приборов иного типа. Именно данный факт привёл к появлению большого количества модификаций, предназначенных для специфических условий лабораторных лотков.

1.5 Современные методы

В настоящее время при измерениях используются сложные современные электронные и оптические системы. Большую роль играют свойства ультразвука. Ультразвуковые методы используют свойство ультразвука изменять свою скорость распространения в зависимости от движения среды. В настоящее время существует два основных подхода: время-проходной и доплеровский.

При время-проходном методе производится попарная установка датчиков в трубе либо в потоке. Скорость звукового сигнала меняется в соответствии с тем, направлен он по течению или против него. Измерив разницу во времени прохождения сигнала в обе стороны, можно вычислить и скорость потока воды.

В доплеровском методе используется акустический доплеровский профилограф (Рис. 6), который измеряет скорость течения реки, используя эффект Доплера. Прибор испускает короткие ультразвуковые импульсы из 4-5 трансдюсеров под небольшим углом к вертикали. Импульсы отражаются от взвешенных в воде частиц, таких как ил и планктон, которые двигаются с потоком. Частота отражённого от этих элементов сигнала сдвигается в связи с движением частиц вместе с водой. Зная величину сдвига, можно определить скорость потока воды.



Рисунок 6. Доплеровский профилограф

Профилографы используют несколько акустических лучей, направленных под углом, чтобы определить не только скорость, но и направление течения в трёхмерном пространстве. Для профилирования река делится на «ячейки» по глубине (5-100 см). Каждый трансдюсер сканирует столб потока, с помощью 4 лучей удаётся получить 3D-скорость потока (V_x , V_y , V_z).

Профилограф был создан для решения масштабных задач. За один цикл измерений единственный прибор может построить полный профиль скорости от поверхности до дна, что позволяет сэкономить большое количество времени при крупных исследованиях.

Данные методы обладают крайне высокой точностью, но при этом имеют и некоторые ограничения. Некоторое влияние на точность оказывает изменение скорости звука в воде в зависимости от параметров воды (плотности, температуры, солёности, давления). Допплеровские профилографы также не могут работать в очень чистой воде, так как в ней нет примесей, по которым можно определять скорость. Большая замусоренность и толстый слой ила также сбивают точность, так как звуковые волны не могут пробиться через слой ила, сигнал подавляется, и его считают дном, когда на деле до дна ещё может быть довольно большое расстояние. Важным недостатком данного прибора является его стоимость, которая в настоящее время может достигать до 10 млн. рублей, что не позволяет использовать его повсеместно. В настоящее время в России стараются не использовать профилографы в зимнее время года, во многом из-за опасений потерять этот довольно дорогой прибор, а также из-за отсутствия методик измерения при ледовых явлениях. Приборы представляют из себя технически сложные устройства, которые требуют высококвалифицированного обслуживания и осторожной эксплуатации, что особенно заметно в регионах с суровыми климатическими условиями. Также в связи с тем, что в нашей стране это оборудование практически не производится, в случае поломки могут возникнуть очень большие сложности с его ремонтом.

Существует также метод, основанный на законе электромагнитной индукции Фарадея. Из этого закона мы знаем, что в случае, если токопроводящая

жидкость (такая, как вода) движется через магнитное поле, в ней образуется электродвижущая сила. Величина этой силы пропорциональна скорости потока. Датчики прибора считывают эту силу и на её основе вычисляют скорость потока воды. Данный метод обладает высокой точностью и справляется со своей задачей в загрязнённой воде. Однако в случае, если частицы в воде изолируют поток, либо в случае, если вода очень сильно очищена (либо дистиллирована), то она не проводит электрический ток и прибор не может получить данные.

Одной из перспективных линий развития методик является использование оптических и лазерных технологий (Рис. 7). Лазерная доплеровская анемометрия использует эффект Доплера. Лазер расщепляется на два пучка, которые пересекаются в потоке и создают интерференционную картину. Когда частица-трассер, которая может быть как естественной, так и специально добавленной в воду, перемещающаяся в потоке, попадает в область пересечения двух лазерных пучков, она рассеивает свет. Рассеянный свет собирается оптикой и попадает на фотодетектор. Частота такого света отличается от исходной и это различие пропорционально скорости частицы и всего потока.



Рисунок 7. Лазерный измеритель скорости водного потока

Такая методика применяется в гидродинамических исследованиях, а также при проектировании судов. К преимуществам следует отнести неинвазивность метода, так как установка не ущемляется в поток ничем, кроме лазеров.

Измерения не ограничены одной компонентой скорости, можно измерять и две, и три. При этом анемометрия обладает высокой пространственной и временной разрешающей способностью и подходит для изучения турбулентных течений. Однако, как и другие современные системы, данная схема сложна как в плане конструкции, так и в плане обработки сигнала, так как требуется выделять полезный сигнал среди большого количества шума. Кроме того, поток должен иметь некоторое количество рассеивающих частиц, причём их не может быть как слишком мало, так как тогда не от чего рассеиваться, так и слишком много, так как при большой концентрации происходят наложения сигналов частиц друг на друга, что снижает точность измерений.

Метод велосиметрии по изображению частиц позволяет получить сразу векторное поле скоростей вместо обычных точечных измерений. Данный вариант действий используется в гидродинамических и аэродинамических экспериментах, при изучении процессов в турбинах и теплообменниках. В водный поток вводится некоторое количество частиц-маркеров. Лазер формирует тонкую плоскость, называемую световым ножом, которая освещает эти частицы. С помощью высокоскоростной камеры производится фиксация изменения положения частиц за известный крайне короткий промежуток времени. Эту фиксацию мы получаем, сделав два последовательных кадра движения частиц. По смещению групп маркеров между кадрами алгоритм вычисляет вектор скорости для каждой области. Велосиметрия позволяет визуализировать сложные структуры потока, при этом полученные течения в комбинации со стереоскопическими камерами являются трёхмерными. Не считая частиц-маркеров, метод не подразумевает вмешательство в структуру потока. К ограничению стоит отнести большую зависимость точности вычислений от параметров частиц-маркеров. Для каждой конкретной задачи требуются маркеры определённого размера и плотности. В случае, если частицы слишком крупные или тяжёлые, может измениться характер их взаимодействия с потоком. Также из-за того, что результатом метода является векторное поле

скоростей, возникает необходимость в обработке значительных массивов изображений, что приводит к большим затратам на вычислительные ресурсы.

Развитием двух предыдущих методов является планарная доплеровская велосиметрия. В этом случае мы получаем поле скоростей в плоскости. Суть метода совпадает с лазерной доплеровской анемометрией, однако для выделения сдвига используют спектральный фильтр. Таким фильтром может быть, к примеру, ячейка с парами йода. Камера регистрирует распределение интенсивности света, которое напрямую отражает распределение проекций скоростей. С помощью данного метода удаётся получать мгновенные поля скоростей в плоскости в высокоскоростных потоках, в которых другие методы обладают большими ограничениями. К недостаткам стоит отнести сложную оптическую настройку агрегатов, а также зависимость точности измерения от количества частиц.

Следует заметить, что в настоящее время можно выяснить скорость водного потока и с помощью оптоволоконных систем. Такие системы используют изменение характеристик оптического сигнала при взаимодействии с жидкостью и хорошо подходят для сложных условий либо для агрессивных сред.

В современных системах для повышения надёжности измерений и получения наибольшего из возможных количества данных чаще всего стараются комбинировать несколько методов и продвинутовую обработку данных (с усреднением, фильтрацией и интеграцией с GPS или батиметрией).

2. Модернизация гидрометрических трубок для лабораторных исследований

2.1 Актуальность проблемы

Проблема создания методики и аппаратуры для определения малых скоростей течения воды стоит перед нами с середины XX века и не теряет своей актуальности. Каждое поколение инженеров-гидрологов пытается получить прибор, который сможет дать более точные, быстрые и стабильные данные в сложных лабораторных условиях, а также уменьшит нагрузку на экспериментатора и расширит возможности для изучения неуловимых на данный момент характеристик потока. Классические версии гидрометрических трубок практически не могут измерить скорость водного потока, меньшую 15-20 см/с, с приемлемой для оценки результатов точностью. В настоящее время под малыми скоростями принято понимать скорости, меньшие 2-3 см/с. В связи с этим требуется повысить чувствительность приборов, не ухудшив при этом других его характеристик.

Градуировочная характеристика, особенно на малых скоростях, ведёт себя нелинейно. И при лабораторных исследованиях с часто варьирующимися условиями, данная нелинейность вынуждает вводить сложные поправочные коэффициенты либо ограничивать диапазон с достоверными результатами. В связи с этим одной из задач, стоящих перед инженерами, является возможность сделать характеристику более линейной либо разработать алгоритмы, позволяющие откорректировать результат.

Ещё одной задачей, с которой предстоит разобраться, является инерционность прибора. Показания, полученные во время проведения опытов, не отображают мгновенной реакции на изменение скорости потока. В связи с этим при нестандартных условиях эксперименты часто теряется важная динамическая информация.

Гидрометрические вертушки стандартных конструкций подвержены сильному влиянию окружающей среды. Приборы чувствительны к углу

набегания потока. Кроме того, введение трубки в водный поток создаёт некоторые возмущения, что приводит к искажению результатов. А взвешенные частицы, имеющиеся в водном потоке, могут забивать отверстия или оседать на поверхностях, меняя гидродинамические свойства оборудования и внося системные ошибки. Одним из способов решить данную задачу является оптимизация формы наконечника, сглаживание поверхностей, а также использование устойчивых к загрязнению и коррозии материалов.

Современное поколение исследователей нуждается в приборе, который не просто получает результат, но ещё и автоматически записывает показания и передаёт их в базу данных для последующего анализа. Имеющиеся в настоящее время приборы следует обновить с учётом добавления электронных компонентов, модулей для цифровой передачи данных либо интегрировать их с программным обеспечением для обработки информации.

В рамках данного исследования модернизация гидрометрической трубки была проведена именно этим путём.

2.2 Технические решения измерения скорости течения с помощью гидрометрической трубки

Прибор представляет собой стандартную гидрометрическую трубку с присоединённым к ней датчиком давления с аналого-цифровым преобразователем HX710B. Этот 24-битный преобразователь используется в модулях датчиков давления для интеграции с микроконтроллерам Arduino. Модуль состоит из датчика давления MPS20N0040D и микросхемы HX710B.

Датчик давления MPS20N0040D собран по мосту Уитстона на основе тензодатчика, прикреплённого к диафрагме. Датчик работает как переменный резистор: любое изменение давления приводит к изменению электрического сопротивления датчика.

Микросхема HX710B является аналого-цифровым преобразователем. Её задача – обработать сигнал датчика и преобразовать его в цифровой формат.

Модуль обладает следующими характеристиками:

- Диапазон измерения давления: 0-40 кПа;
- Напряжение питания: 3,3-5 В;
- Тип выхода: цифровой;
- Размеры модуля: 19×18 мм;
- Вес модуля: около 4 г.

Подключение к Arduino происходит с помощью четырёх проводов: VCC подключается к источнику питания, GND – к земле, SCK представляет собой тактовый вывод, используемый для синхронизации передачи данных и цифровой вывод OUT для чтения данных датчика.

Для работы с датчиком HX110B можно использовать библиотеку, специфичную для этого модуля. Данная библиотека была скачана с официального сайта и установлена в среду разработки Arduino IDE.

Для отображения информации и работы с библиотекой был написан программный код, представленный ниже:

```
#include "HX710B.h"

const int DOUT = 2; // вывод OUT
const int SCLK = 3; // тактовый вывод

HX110B pressure_sensor;

void setup() {
  Serial.begin(57600); // инициализация последовательной связи
  pressure_sensor.begin(DOUT, SCLK); // инициализация датчика
}

void loop() {
  if (pressure_sensor.is_ready()) {
    Serial.print("Pascal: ");
    Serial.println(pressure_sensor.pascal());
    Serial.print("ATM: ");
    Serial.println(pressure_sensor.atm());
    Serial.print("mmHg: ");
    Serial.println(pressure_sensor.mmHg());
    Serial.print("PSI: ");
    Serial.println(pressure_sensor.psi());
  } else {
    Serial.println("Pressure sensor not found.");
  }
  delay(1000);
}
```

Данный код начинается с подключения специальной библиотеки для данного датчика. Для корректной работы требуется задать 2 константы пинов Arduino: DOUT и SCLK. DOUT представляет из себя пин, по которому модуль передаёт данные. Данный пин подключён к пину 2. Константа SCLK является тактовым пином, необходимым для синхронизации передачи данных. Эта константа подключена к пину 3.

Далее создаём экземпляр класса HX710B под именем pressure_sensor. Без объявления этого экземпляра, либо в отсутствие библиотеки, компиляция кода не состоится и выдаст ошибку.

За всеми вышеперечисленными процедурами следует запуск последовательного порта на скорости 57600 бод, что необходимо для вывода данных на монитор порта (Рис. 8), а также вызов метода инициализации датчика с передачей ему номеров пинов (номера пинов были заданы с помощью переменных DOUT и SCLK).

После инициализации датчика с помощью цикла loop() методом is_ready() проверяется его готовность. Если датчик готов, выводится значение давления в требуемых единицах, в случае же неполадок выводится сообщение “Pressure sensor not found”. Функция delay(1000) позволяет задать паузу между измерениями в одну секунду.

The image shows a screenshot of the Arduino IDE's serial monitor window. The window title is "COM4". The output text is as follows:

```
Pascal: 404.18
ATM: 0.00
mmHg: 5.17
PSI: 0.15
Pascal: 896.28
ATM: 0.01
mmHg: 3.03
PSI: 0.06
Pascal: 404.32
ATM: 0.00
mmHg: 3.03
PSI: 0.06
```

Рисунок 8. Пример вывода данных с помощью скетча

2.2.1 Проведение эксперимента

Перед началом работы требовалось проверить работоспособность прибора и корректность получаемых с его помощью значений. В связи с этим перед началом измерений была проведена градуировка прибора (Рис. 9). В процессе градуировки прибор постепенно погружался в стоячую воду. Одновременно для каждой из трубок производилось снятие показаний давления с датчика при погружении на каждый сантиметр. Далее с помощью формулы гидростатического давления

$$P = \rho gh,$$

где ρ – плотность жидкости, g – ускорение свободного падения, принимаемое за $9,81 \text{ м/с}^2$, h – высота столба жидкости, можно узнать значение h :

$$h = \frac{P}{\rho g}.$$

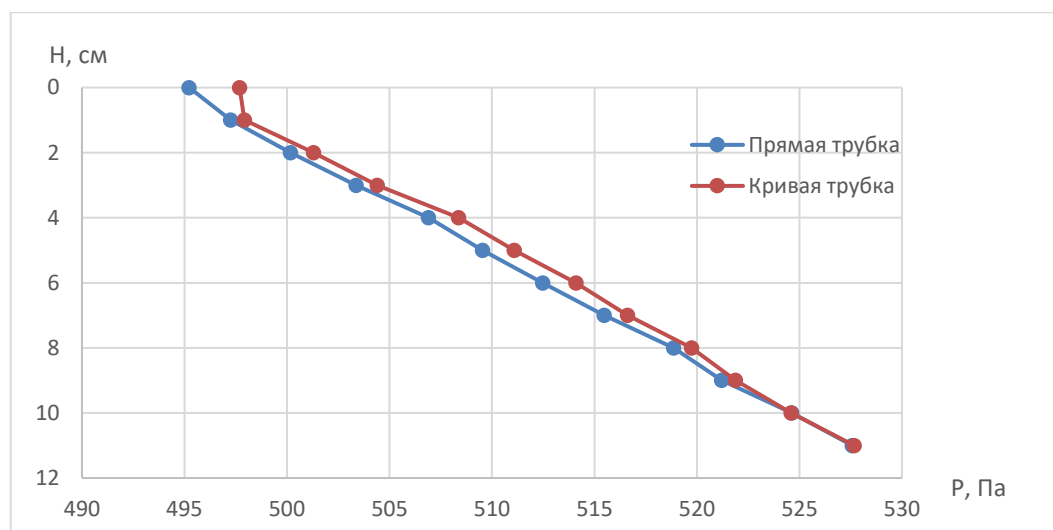


Рисунок 9. Результаты градуировки прибора

В результате градуировки в стоячей воде получилось, что с увеличением глубины погружения увеличивалось и давление столба жидкости, причём зависимость для каждой из трубок оказалась близка к линейной. При этом небольшая разница в давлениях между трубками связана с различием их формы.

Для проведения измерений требовались: компьютер (либо телефон) с установленной средой Arduino, имеющий скомпилированный скетч, гидрометрическая трубка, а также датчик давления с микроконтроллером.

В рамках исследования работоспособности прибора измерения производились на лабораторной установке в экспериментальной лаборатории кафедры «Водно-технических изысканий». Установка представляла собой длинный лоток, на который возможно подавать некоторые фиксированные расходы воды и, таким образом, задать постоянную скорость течения водного потока. Для построения скоростной эпюры измерения были проведены в пяти точках: у поверхности, на 0,2h, 0,6h, 0,8h и у дна (где h — глубина потока на этой вертикали), в связи с чем перед началом измерений была выяснена глубина водного потока.

После получения значений давления столба жидкости требуется узнать разницу давлений в трубках. Зная разницу этих давлений на основании уравнения Бернулли производим вычисление скорости водного потока:

$$V = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

В ходе эксперимента для проверки точности измерений были произведены измерения скорости на поверхности течения поплавковым методом. Результаты представлены в таблице 1.

№ эксперимента	Глубина, м	V, м/с ²
1	0,2	0,12
2	0,12	0,039
3	0,14	0,014

Таблица 1. Результаты измерений поверхностной скорости водного потока с помощью поплавков

Полученные в ходе эксперимента данные приведены в таблицах 2 – 4. По этим данным были построены эпюры распределения скорости водного потока (Рис. 10 – 12).

2.2.2 Данные, полученные в ходе эксперимента

Глубина, м	P1, Па	P2, Па	ΔP	V, м/с ²
0	495,31	497,15	1,84	0,061
0,04	505,37	508,24	2,87	0,086
0,12	525,39	529,97	4,58	0,092
0,16	539,62	542,28	2,66	0,082
0,2	549,45	553,67	4,22	0,079

Таблица 2. Расчёт скорости водного потока. Эксперимент 1

Глубина, м	P1, Па	P2, Па	ΔP	V, м/с ²
0	495,03	495,61	0,58	0,034
0,02	500,74	501,87	1,13	0,048
0,06	509,09	512,78	1,9	0,062
0,1	523,85	524,52	3,69	0,086
0,12	529,09	529,46	1,98	0,063

Таблица 3. Расчёт скорости водного потока. Эксперимент 2

Глубина, м	P1, Па	P2, Па	ΔP	V, м/с ²
0	497,69	497,76	0,07	0,012
0,03	499,3	501,87	2,57	0,072
0,08	506,98	508,75	1,77	0,058
0,11	520,72	521,25	0,53	0,032
0,14	525,26	525,32	0,06	0,026

Таблица 4. Расчёт скорости водного потока. Эксперимент 3

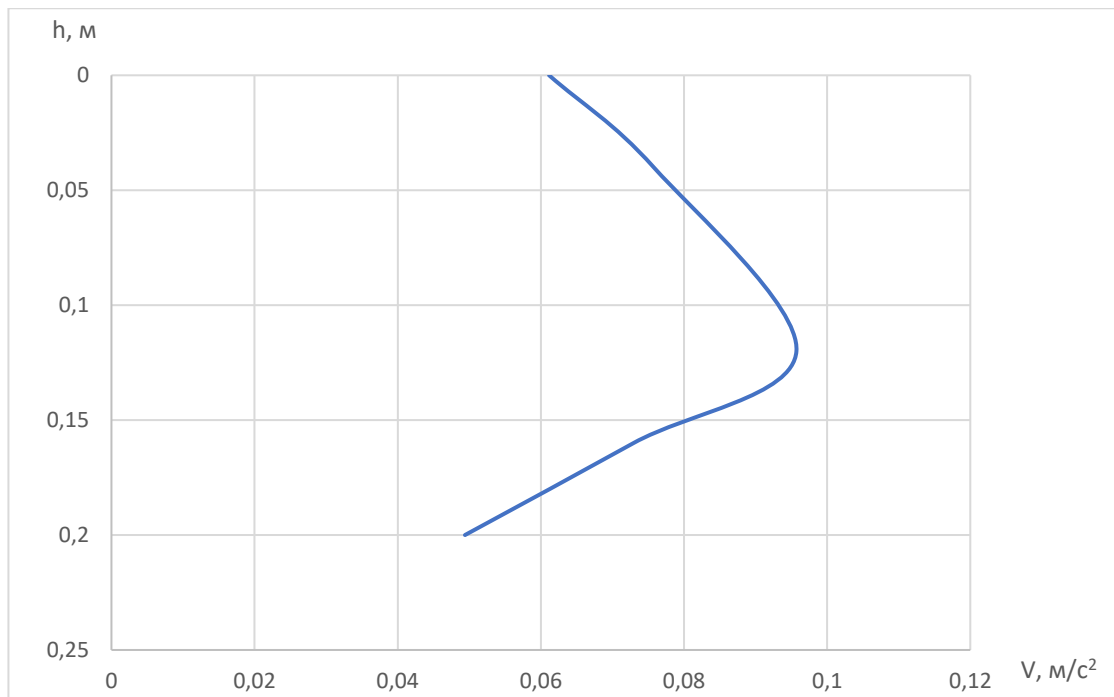


Рисунок 10. Эпюра распределения скоростей (эксперимент 1)

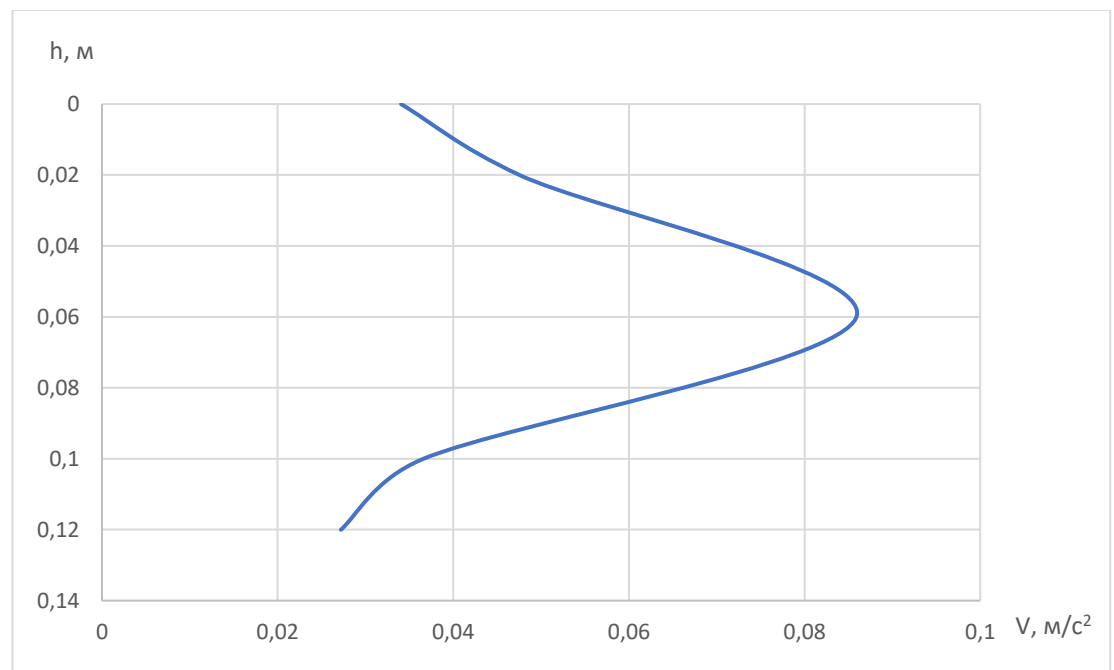


Рисунок 11. Эпюра распределения скоростей (эксперимент 2)

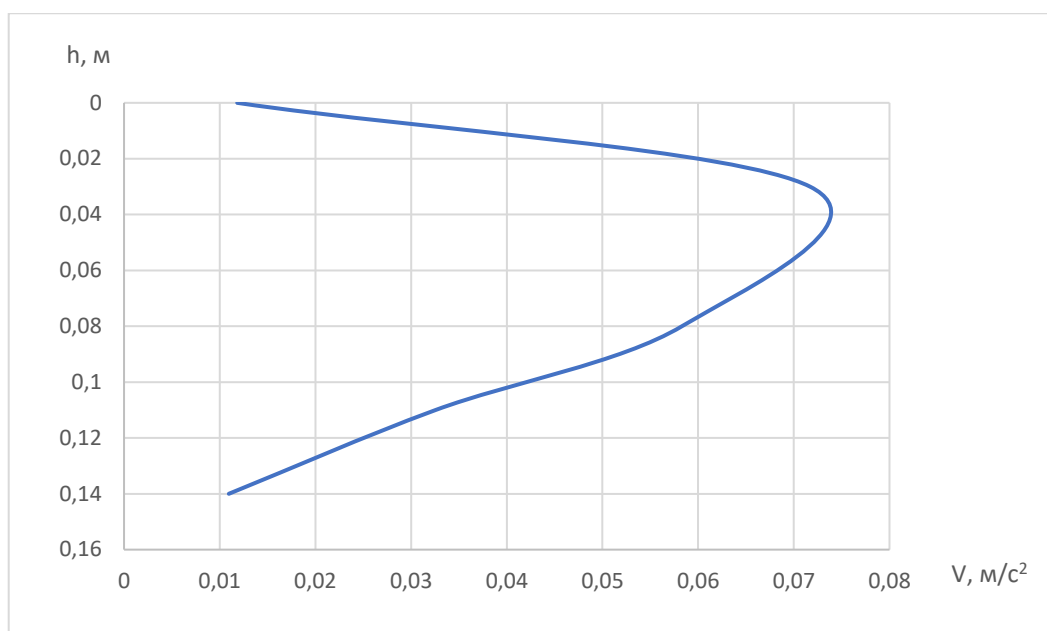


Рисунок 12. Эпюра распределения скоростей (эксперимент 3)

Для более точной проверки работоспособности прибора измерения также были произведены в полевых условиях на базе практик РГГМУ в деревне Даймище на реке Оредеж (Таблица 5, Рис. 13)), а также на ручье, протекающем возле базы (Таблица 6) .

Глубина, м	$P1$, Па	$P2$, Па	ΔP	V , m/s^2
0	497,71	497,74	0,03	0,01
0,06	538,48	541,92	3,44	0,08
0,18	606,63	607,92	1,29	0,05
0,22	627,83	628,31	0,48	0,03
0,28	647,83	647,66	0,03	0,01

Таблица 5. Расчёт скорости водного потока на реке Оредеж

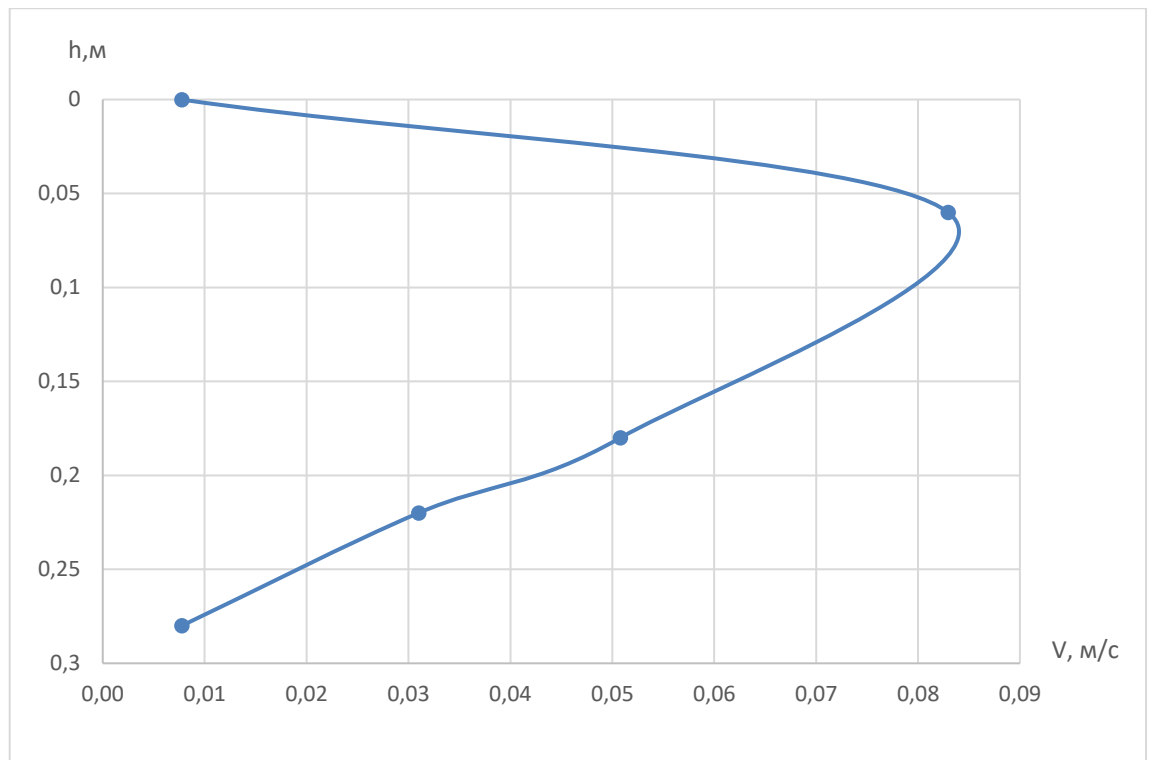


Рисунок 13. Эпюра распределения скоростей на реке Оредеж

	$P1$, Па	$P2$, Па	ΔP	V , м/с ²
Поплавок				0,07
Гидрометрическая трубка	495,9	497,72	0,82	0,06

Таблица 6. Расчёт скорости водного потока на ручье

2.2.3 Анализ результатов лабораторного эксперимента

В ходе анализа результатов лабораторного исследования были сделаны следующие выводы.

В ходе первого эксперимента разница между скоростью, полученной с помощью гидрометрической трубки, и скоростью, полученной с помощью поплавка, оказалась существенной. Это может быть связано как с несовершенством конструкции, так и с большой погрешностью наблюдений за скоростью воды с помощью поплавка. Было замечено, что максимальная

скорость водного потока пришлась на его середину. Скорее всего, это связано с искусственностью лотка для наблюдений. Стенки лотка создают зоны ускоренного и замедленного течения, что сдвигает максимум скорости в зоны ускоренного обтекания.

В рамках последующих экспериментов также наблюдались отклонения от измерений, произведённых с помощью поплавка, но в меньшем объёме. Скоростной максимум также сдвинулся от поверхности водного потока ближе к его середине, что подтверждает предположение о том, что деформации водного потока происходят из-за рукотворности лабораторной установки.

Во время проведения эксперимента на реке Оредеж удалось построить эпюру скоростей, характерную для данной реки. Однако было зафиксировано значительное различие в полученных значениях скорости у поверхности между поплавком и гидрометрической трубкой.

При измерении скорости на ручье в связи с его малой глубиной значения снимались только по одной точке. Полученные значения оказались достаточно близки друг к другу.

В результате были сделаны выводы о том, что измерения, сделанные этим прибором, в основном позволяют рассчитать скорость водного потока и построить скоростную эпюру. Однако замечены погрешности при измерении скорости близко к поверхности воды. Также проблемой является то, что данный прибор обладает только одним датчиком давления, отчего приходится снимать показания отдельно для каждой из трубок, что также добавляет погрешностей. Решением этой проблемы может быть добавление второго датчика давления и изменение скрипта, чтобы в результате он сразу выдавал разницу давлений или даже сразу значение скорости.

Заключение

В рамках данной работы была достигнута цель оценить эффективность применения гидрометрических трубок в лабораторных исследованиях. В соответствии с целью была собрана информация об истории возникновения и модернизации гидрометрических трубок, а также были изучены многие варианты их модификаций. Были также рассмотрены другие варианты получения информации о скорости потока жидкости и выявлены их положительные и отрицательные стороны. В рамках данного анализа был выявлен способ, с помощью которого производилась сверка результатов измерений экспериментального прибора со способом, признанным эталоном.

В качестве эталонного способа для проверки точности измерений было выбрано измерение скорости водного потока с помощью поплавков в связи с его универсальностью и отсутствием дополнительных требований к оборудованию. Данный способ может обладать достаточно сильными погрешностями, при этом хорошо проявляя себя при измерениях рек с малыми скоростями течения.

В рамках работы был предложен вариант модификации гидрометрической трубки для упрощения снятия с неё измерений. Данный прототип был опробован в условиях лаборатории и на открытой воде. Были выявлены его достоинства и недостатки.

В результате исследования было выяснено, что гидрометрические трубки являются одним из самых простых конструктивно приборов, насчитывающем уже больше трёх веков истории. С момента создания первой трубки она пережила множество модификаций, сохранив при этом свои основные черты.

При апробации прототипа было выявлено, что он позволяет производить измерения достаточно быстро и без большого количества лишних действий, но имеет пути для улучшения конструкции и ещё большего упрощения измерений.

Список использованных источников

1. Быков В. Д., Васильев А. В. Гидрометрия. — 4-е изд., перераб. и доп. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1977. — 448 с., 1 л. ил. : ил. : 22 см.;
2. Михайлов В. Н. (д-р геогр. наук) Гидрология учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по географическим специальностям / В.Н. Михайлов, А.Д. Добровольский, С.А. Добролюбов; Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. — Москва : Высшая школа, 2005. — 462, [1] с. ил.; 22.;
3. Вознюк, Ю. С. Приборы для измерения скорости течения водных потоков. Гидрометрическая вертушка / Ю. С. Вознюк // Экологический вестник Донбасса. — 2023. — № 8. — С. 29-35. — EDN HNICZF.
4. Викулин, П. Д. Методы определения скорости потока в открытых каналах при турбулентном режиме / П. Д. Викулин, А. О. Фролова // Водоснабжение и санитарная техника. — 2013. — № 6. — С. 68-71. — EDN QBBMYZ.
5. Каминский, Ю. Д. Лазерные доплеровские измерители скорости и длины кабелей и проволоки / Ю. Д. Каминский, С. Ю. Проскурнев, В. И. Заманский // Кабели и провода. — 2008. — № 2(309). — С. 27-29. — EDN IULTAB.
6. Назмиев, П. И. Гидрометрия: методические указания к практическим занятиям обучающихся по направлению подготовки 20.03.02 «Природообустройство и водопользование», дисциплина «Гидрометрия» очной и заочной форм обучения / П. И. Назмиев, А. В. Григорьева ; Министерство науки и высшего образования РФ, Уральский государственный лесотехнический университет, Кафедра лесных культур и биофизики. — Екатеринбург, 2019. — 50 с. : ил.
7. Применение метода LSPIV для измерения поверхностных скоростей в лабораторных условиях и определение влияния трассеров на результат / Е. С. Комарницкий, К. О. Балабин, А. П. Колomoец, Н. В. Лагай // Гидрология и океанология - 2025 : Сборник материалов конференции студенческого научного общества Института гидрологии и океанологии РГГМУ, Санкт-Петербург, 25 апреля 2025 года. — Казань: ООО "Бук", 2025. — С. 117-128. — EDN PPRWBT.

8. Подключение датчика давления HX710B к Arduino [Электронный ресурс]; URL: <https://robotchip.ru/podklyuchenie-datchika-davleniya-hx710b-k-arduino/?ysclid=mqz4vw642328729686> (Дата обращения: 19.06.2026)
9. Клименко, Д. Е. Развитие гидрометрических вертушек в России и за рубежом / Д. Е. Клименко // Географический вестник. – 2010. – № 2(13). – С. 64-76. – EDN NCSHVD.
10. НИИТеплоприбор. Лазерные доплеровские измерители [Электронный ресурс]; URL: [Электронный ресурс]; URL: <https://niiteplopribor.ru/lazernye-izmeriteli/> (Дата обращения: 13.06.2026)