



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему **Методика измерения расходов
воды пузырьковым методом**

Исполнитель **Ворончихин Степан Сергеевич**

Руководитель **д.г.н., профессор Барышников Николай Борисович**

Консультант **к.г.н. Исаев Дмитрий Игоревич**

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

кандидат географических наук, доцент **Исаев Дмитрий Игоревич**

«17» ноя 2016г.

Санкт-Петербург
2016

Содержание

Введение

I. Общие сведения о применяемых методах измерений расходов воды

1.1 Общие сведения

1.2 Современные методы измерения расходов воды (профилограф)

1.3 Интеграционные методы измерения расходов воды

1.4 Авиаизмерения расходов воды

1.5 Измерения поверхностными поплавками

II. Теоритические основы методов измерения скоростей

III. Натурные исследования пузырькового способа на реке Оредеж

3.1 Физико – географическое описание бассейна реки Оредеж

3.2 Техническое решение. Описание устройства

3.3 Аprobация устройства. Оценка полученных результатов

IV. Лабораторные исследования

4.1 Описание лабораторной установки

4.2 Описание методики проведения экспериментов

4.3 Анализ результатов измерений

Заключение

Выводы

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к дистанционным методам измерений гидрологических величин был всегда. Это вполне объяснимо, потому что дистанционные методы позволяют получать информацию практически в любое время и с минимальным непосредственным участием человека .

В 60-е годы при изучении малых и средних рек активно использовалась авиация, развивались методы аэрогидрометрии. В частности, для измерения расходов воды использовались поплавки интеграторы. Наряду с широким применением профилографа и традиционными способами измерения скоростей вертушками в Западной Европе применяются установки основанные на принципе измерения скорости течения по всплывающим пузырькам воздуха.

Целью магистерской диссертации являлась разработка и тестирование установки, а так же уточнения зависимости скорости всплытия пузырька от определяющих факторов: избыточное давление, температура воды, диаметр диффузора и других. .

В качестве объекта отработки методики была использована река Оредеж, на базе практики университета РГГМУ в посёлке Даймище.

Было опробовано несколько установок.

Были поставлены задачи :

замена технических средств, выработавших свой ресурс, на современные средства;

переход на безбумажную технологию получения, обработки и распространения наблюдаемой информации с накоплением данных на технических носителях;

использование современных средств связи для своевременной и надежной передачи оперативной информации из пунктов наблюдений в центры сбора информации.

Ежедневные фотографирования процессов измерений на реке Оредеж

В лабораторных условиях уточнение определяющих факторов влияющих на всплытие пузырьков

I. Способы измерения расходов воды

1.1 Общие сведения

Понятие о расходе воды как характеристике режима и водности рек складывалось по мере развития количественных методов гидрологии. По-видимому, раньше всего оно возникло в пустынных и засушливых районах, страдающих от маловодья. Кочевые племена Сахары, водность оазисных источников оценивали количеством верблюдов, которых можно напоить из них. В Древнем Риме существовала мера воды (контария), которая была связана только с диаметром выходного отверстия труб, причем не принимались во внимание ни скорость, ни напор. В I в. до н. э. Герон Александрийский уже различал основные элементы расхода воды: площадь поперечного сечения и скорость потока.

Представление о расходе воды вытекает непосредственно из принципа неразрывности. Его впервые сформулировал Леонардо да Винчи, который полагал, что «в реках может протекать равный объем воды в равные промежутки времени, несмотря на различие длины, ширины, глубины и уклонов русла.» Окончательное определение расхода воды сложилось в XVI—XVII вв. Вот архаичный, но принципиально строгий образчик формулы расхода: «квадрат речного профиля, умноженный на скорость

известного реки в определенное время течения, показывает точно кубическое воды содержание или количество водяного истечения» (XVIII в.)

Кратко измеренный расход воды определяется как средний за время измерения объем воды, протекающий через поперечное сечение потока за единицу времени. Речь идет именно об измеренном расходе воды, который относят к фиксированному уровню, осредненному за время измерения. Взаимное соответствие расходов и уровней (кривые расходов или уравнения регрессии расходов по уровням) используются для непрерывного учета речного стока по данным отдельных измерений расхода воды.

Расход воды геометрически представляется как объем водного пространства, заключенный между горизонтальной плоскостью живого сечения и поверхностью, проходящей через концы векторов скоростей течения. Это водяное тело называется гидрометрической моделью расхода воды. Модель измеренного расхода воды является формой синтеза его элементов и зависит от применяемых методов измерения.

Главнейшие из них следующие:

- 1) метод «скорость—площадь», основанный на измерении поперечного сечения потока и скоростей течения в точках или интегрально на вертикалях, в отсеках и по ширине русла;
- 2) метод смешения с вводом в поток индикаторов и определением степени их разбавления;
- 3) по расходомерным устройствам и характеристикам пропускной способности гидротехнических элементов сооружений и турбин ГЭС;
- 4) объемный метод, основанный на фиксации времен и наполнения мерных емкостей;
- 5) физические методы — с применением ультразвука, электромагнитной индукции др.

Каждый из методов может быть подразделен в зависимости от применяемых средств измерения скоростей — их основные типы описаны выше. Здесь специально не выделен способ «уклон—площадь», который является скорее расчетным, а не измерительным.

Наиболее трудоемкая операция при определении расхода воды — регистрация и пространственно-временное осреднение скоростей потока. Стремление сократить затраты труда и вместе с тем ускорить производство измерений привело к разработке интеграционных способов определения расходов воды.

В настоящее время получили развитие два способа:

- интеграция скоростей по вертикали вертушками, а также посредством твердых, воздушных и жидкостных поплавков;
- интеграция поверхностных скоростей по ширине потока гидрометрической вертушкой с движущегося судна или с люлек и канатных переправ, а также ультразвуковым и установками.

В недавнем прошлом рекомендовалось применять интеграцию скоростей по живому сечению, но она, помимо технических трудностей, требует неравномерного движения интегратора с таким расчетом, чтобы он перемещался через равные элементы площади за равные промежутки времени. Такое условие практически не удается выполнить, чем создается дополнительная неопределенность в переходе от результатов интеграции к средней скорости.

Метод «скорость—площадь» во всех его разновидностях составляет метрологическую базу современной речной гидрометрии. Из-за изменчивости гидравлических элементов во времени и пространстве расход воды не поддается прямым измерениям. Его значения получают в результате косвенных измерений элементов: расстояний, глубин и скоростей потока. На их основе расходы воды могут быть вычислены различным образом. В связи с этим вводится понятие о математической модели расхода воды как форме

аналитического представления совокупности его элементов. Одна из наиболее распространенных математических моделей расхода воды сводится к его расчленению на частичные расходы, проходящие в отсеках живого сечения между скоростными вертикалями, т. е. вертикалями, на которых тем или иным способом измеряются средние по глубине скорости потока. Модель, построенная на вертикальном расчленении ее секундного объема, служит для вычисления расхода воды по данным точечных измерений скоростей или их

интеграции по вертикали.

Точечные способы измерения расходов воды методом «скорость—площадь».

Точечные способы измерения расходов воды выполняются гидрометрическими вертушками и широко применяются на реках и каналах. В зависимости от числа скоростных вертикалей и количества точек измерения скоростей течения различают следующие варианты способа:

— многоточечный (детальный), при котором в гидростворе назначается 10—15 скоростных вертикалей, а скорости течения измеряются на каждой вертикали в пяти и более точках:

— основной, когда число скоростных вертикалей уменьшается в 1,5—2 раза по сравнению с детальным, а скорости потока измеряются в двух или трех точках каждой вертикали.

— сокращенный.

Основными элементами расхода воды, измеряемого методом «скорость—площадь», как вытекает из самого этого определения, служат средняя скорость потока и площадь живого сечения и глубины.

Промеры глубин производятся в створе измерения расхода воды. При устойчивом русле промеры глубин производятся одним ходом, обычно перед измерением скорости течения. На изученных створах при условии, что русло

не деформируется, глубины можно измерять через три—пять измерений расхода. В этом случае для промежуточных расходов используются данные предыдущего промера с учетом разности уровней при промере и при измерении расхода воды. Промерные вертикали назначаются через равные расстояния в количестве 20—35. При неровном, загроможденном валунами дне количество промерных вертикалей увеличивается. При появлении шуги промеры глубин обязательны при каждом измерении расхода воды. При ледоставе измеряются расстояния от постоянного начала до уреза нижней поверхности льда (этот урез обнаруживается посредством пробных лунок или пробиваемой во льду траншеи). Урез поверхности воды устанавливается по профилю. На всех промерных вертикалях измеряется глубина погружения льда и слоя шуги с погрешностью 1 и 10 см. Рабочей глубиной считается расстояние от нижней поверхности льда (шуги) до дна. Обследование береговых участков производится для определения границ мертвых пространств и назначения дополнительных скоростных вертикалей. Границы мертвых пространств определяются глубинными поплавками. Расстояние между верхним и нижним поплавками делается равным 20—30 см. Поплавок несколько раз опускается в воду с постепенным приближением к берегу. Граница мертвого пространства принимается там, где поплавок стоит неподвижно или движется в обратную сторону.

В некоторых случаях мертвые пространства могут наблюдаться и посредине реки: тогда также определяются их границы и назначаются дополнительные скоростные вертикали.

Назначение скоростных вертикалей

Точность измерения расхода воды определяются количеством и размещением скоростных вертикалей. Одно из главных требований к их размещению состоит в том, чтобы отсеки между ними пропускали равные доли общего расхода воды. Для обеспечения этого условия скоростные вертикали должны размещаться на границах струй в плане течений.

Для определения положения вертикалей измеряют расходы при увеличенном их количестве, вычерчивают поперечный профиль русла и на нем строят интегральную кривую частичных расходов — в долях от общего расхода.

При этом на первой слева вертикали откладывается частичный расход в первом (береговом отсеке на второй вертикали — сумма и т. д.; замыкающую ординату делят на N частей (N равно числу отсеков между скоростными вертикалями). Проектируя отрезки равных долей расхода на интегральную кривую, получают точки расположения скоростных вертикалей. Затем их положение уточняют так, чтобы, во-первых, они по возможности совпадали с точками перелома поперечного профиля русла, а во-вторых, одна из вертикалей находилась на стрежне реки (динамической оси). Местоположение скоростных вертикалей определяется расстоянием от постоянного начала. Это расстояние измеряют стальными лентами или рулетками и закрепляют метками на конструкциях гидрометрических мостиков или метками на разметочных канатах лодочных (паромных) переправ. На широких реках (более 300 м) положение скоростных вертикалей определяется инструментальными засечками теодолитами или мензулой с берега, либо секстантом с судна. Во всех случаях угол, образуемый направлением гидроствора и лучом визирования на любую вертикаль, должен быть не менее 30° .

При устойчивых руслах местоположение скоростных вертикалей остается постоянным. Однако при изменении условий движения потока на участке гидроствора оказывается необходимым назначать дополнительные скоростные вертикали.

При подъеме уровня воды, если расстояние между урезом и ближайшей скоростной вертикалью больше половины расстояния между двумя соседними вертикалями, назначается дополнительная прибрежная вертикаль в следующих местах:

- а) при пологом берегу—посредине между урезом и ближайшей постоянной вертикалью;
- б) при обрывистом берегу — вблизи уреза воды, но не ближе чем в 0,3 м от него.

При наличии мертвых пространств дополнительная скоростная вертикаль назначается на таком расстоянии от границы мертвого пространства, где скорость течения не менее 0,08—0,15 м/с.

В зашугованных и зарастающих руслах, где наблюдаются движения потока отдельными струями, следует назначать дополнительные вертикали как в струйных зонах, так и между ними.

На пойме и ее руслообразных понижениях скоростные вертикали назначаются через две промерных. В остальной части поймы вертикали располагают более редко, в переломных точках поперечного профиля.

В случае большого различия в ширине русла и структуре потока при высоких и низких уровнях назначение скоростных вертикалей производится отдельно для условий половодья (паводков) и межени. При этом две-три скоростные вертикали в стрежневой части потока должны оставаться на одних и тех же местах.

При легкодеформирующемся русле положение скоростных вертикалей приходится назначать заново при каждом измерении расхода воды. Это делается сразу же после промеров поперечного сечения русла.

Все постоянные вертикали обозначаются порядковыми номерами, причем № 1 получает вертикаль, ближайшая к постоянному началу. Дополнительным скоростным вертикалям придается номер ближайшей постоянной вертикали с указанием расстояния до нее (со знаком минус, если дополнительная вертикаль расположена ближе к постоянному началу, и со знаком плюс, если дальше). Номера вертикалей подставляются на марках разметочных канатов и у меток (зарубок) на конструкциях гидрометрических мостиков.

Измерения глубинными поплавками и поплавками-интеграторами

Поплавки этого вида используются для измерения сравнительно малых скоростей течения (до 0,15—0,20 м/с), когда вертушечные измерения мало надежны. Глубинные поплавки применяются также для определения границ мертвого пространства.

Порядок выполнения промерных работ, операций по определению площади живого сечения и назначению скоростных вертикалей не отличается от их организации при вертушечных измерениях.

Что касается измерения скоростей течения, то они производятся в тех же точках, что и при основном способе определения расхода воды вертушкой, но, разумеется, измерительные операции имеют иной характер и становятся, пожалуй, сложнее.

Скорости течения измеряются с лодки, на которой устроены из трех горизонтальных реек створы: верхний, средний и нижний (базис измерений). Рейки располагаются на расстоянии 1 м одна от другой и для удобства работ связываются в жесткую раму. На 0,25—0,50 м выше верхнего створа при помощи шеста пускается глубинный поплавок. По секундомеру определяется время прохождения поплавком расстояния от верхнего створа до нижнего. Если продолжительность хода поплавок от верхнего до среднего створа более 20 с, то секундомер останавливается в момент прохождения поплавком среднего створа. В каждой точке поплавок пускается не менее трех раз. Если продолжительность хода какого-либо поплавок отличается от других более чем на 10%, то наблюдения в этой точке повторяются еще два-три раза.

Скорость в точке вычисляется делением длины базиса — расстояния между створами (1 или 2 м) на среднюю продолжительность хода поплавок. Расход воды вычисляется аналитическим способом аналогично расходу воды, измеренному вертушкой.

Измерения поверхностными поплавками

Точность поплавочных измерений существенно ниже, чем вертушечных, поэтому поверхностные поплавки применяются при рекогносцировочных обследованиях рек, выходе вертушек из строя. При интенсивном ледоходе, когда вертушечные измерения становятся невозможными, в качестве поплавков служат отдельные льдины.

Чтобы избежать влияния ветра на точность измерения расхода воды, поплавочные наблюдения проводят при штиле или небольшом ветре — 2—3 м/с. На больших реках поплавочные измерения могут производиться при скорости ветра до 5 м/с при условии ее измерения анемометром для введения соответствующих поправок.

Для измерения расхода воды поверхностными поплавками выбирается прямолинейный участок реки с однообразными глубинами, шириной и продольным уклоном водной поверхности на протяжении трех — пятикратной ширины реки. По берегу параллельно основному направлению течения прокладываются магистраль и перпендикулярно к ней разбиваются три створа: верхний, средний и нижний. Расстояние между крайними створами назначается таким, чтобы продолжительность хода поплавков между ними была не менее 20 с. Если на участке имеется гидрометрический створ, то он обычно служит средним створом, а верхний и нижний створы разбиваются параллельно ему на равных расстояниях. В 5—10 м выше верхнего створа назначается пусковой створ, с которого при измерении скорости течения пускаются поплавки с таким расчетом, чтобы при подходе к верхнему створу поплавков принял скорость той струи потока, которая его перемещает.

На реках шириной до 100 м в средних створах натягиваются как можно ниже над водой тонкие стальные канаты.

Положение верхнего и нижнего створов закрепляют вешками. Канат, натягиваемый через средний створ, размечается хорошо заметными с берега метками (например, свешивающимися с троса цветными полосками материи), которые служат для промера глубин и для определения мест

прохождения поплавками створа. На широких реках, где пользоваться канатами неудобно или затруднительно, створы закрепляются вехами, а место пересечения поплавком среднего створа и положение промерных точек определяется засечками с берега угломерным инструментом.

Измерение скорости поверхностными поплавками состоит в определении времени прохождения ими расстояния от верхнего до нижнего створа и мест прохождения через средний створ.

В пусковом створе забрасывается с берега или пускается с лодки первый поплавок, и в момент прохождения им верхнего створа по сигналу наблюдателя, стоящего в этом створе, техник пускает секундомер. В момент пересечения поплавком среднего створа отмечается место его прохождения от постоянного начала по размеченному канату или засечками с берега угломерным инструментом. Засечка поплавок производится в момент подачи сигнала наблюдателем, стоящим в среднем створе. На мензуральном планшете техник ставит черточку на линии створа и около неё записывает номер поплавок. При прохождении поплавком нижнего створа по сигналу наблюдателя, стоящего у этого створа, техник останавливает секундомер.

Следующий поплавок пускается на некотором расстоянии от первого, и вся работа по измерению скорости течения повторяется в том же порядке. Всего пускается 15—20 поплавков, равномерно распределенных по ширине реки. Вместо визуальных засечек местоположения поплавков, может быть использована фотосъемка их специальным фотоаппаратом. Фотоаппарат размещается в этом случае в наиболее высоком месте берега или на специальной вышке с таким расчетом, чтобы снимком захватывалась вся ширина реки.

Если невозможно пустить поплавки по всей ширине реки, например на реках с быстрым течением, где поплавки сносятся к середине потока, расходы воды определяются по наибольшей поверхностной скорости. В этом случае на стрежневую часть потока пускается 5—10 поплавков. Из всех пущенных поплавков выбираются три поплавок с наименьшей

продолжительностью хода, отличающиеся друг от друга по времени не более чем на 10 %; при большем отклонении продолжительности хода пускается еще пять-шесть поплавков.

Для определения скорости течения строится график продолжительности хода поплавков, на котором по горизонтальной оси откладываются расстояния от постоянного начала до места прохождения поплавками среднего створа, а по вертикальной оси — продолжительность хода поплавков между верхним и нижним створами. По нанесенным точкам проводится осредненная эпюра распределения продолжительности хода поплавков по ширине реки. В местах перегибов эпюры, а при плавной её форме через равные расстояния назначается не менее пяти-шести скоростных вертикалей, которые для удобства обработки совмещаются с промерными вертикалями. Для каждой скоростной вертикали вычисляется поверхностная скорость течения путем деления расстояния между верхним и нижним створами на продолжительность хода поплавок, снятую с эпюры. Умножая площади отсеков между скоростными вертикалями на полусумму поверхностных скоростей на них, получают частичные фиктивные расходы воды. Их сумма, с учетом краевых коэффициентов, принятых в формуле, дает общий фиктивный расход воды. Фиктивным он назван потому, что получен по данным о поверхностных скоростях и завышен по сравнению с действительным расходом.

1.2 Современные методы (профилограф)

Принцип действия профилографов основан на подаче короткого ультразвукового сигнала фиксированной частоты в воду. Отражатели (частицы), имеющиеся в воде, возвращают сигнал к датчику профилографа. Отраженный импульс имеет сдвиг в частоте, пропорциональный скорости потока. Ультразвуковой сигнал профилографа делит водный столб по вертикали на множество дискретных сегментов, называемых "ячейками глубины". Для получения вертикальной эпюры (профиля) скоростей отраженный импульс обрабатывается для каждой "ячейки глубины".

Отраженный сигнал оцифровывается с помощью ПО в массив точек. На

основании полученных данных вычисляются различные характеристики водного потока в локальной точке и по всей глубине.

В принятой системе профилирования используются два необходимых условия:

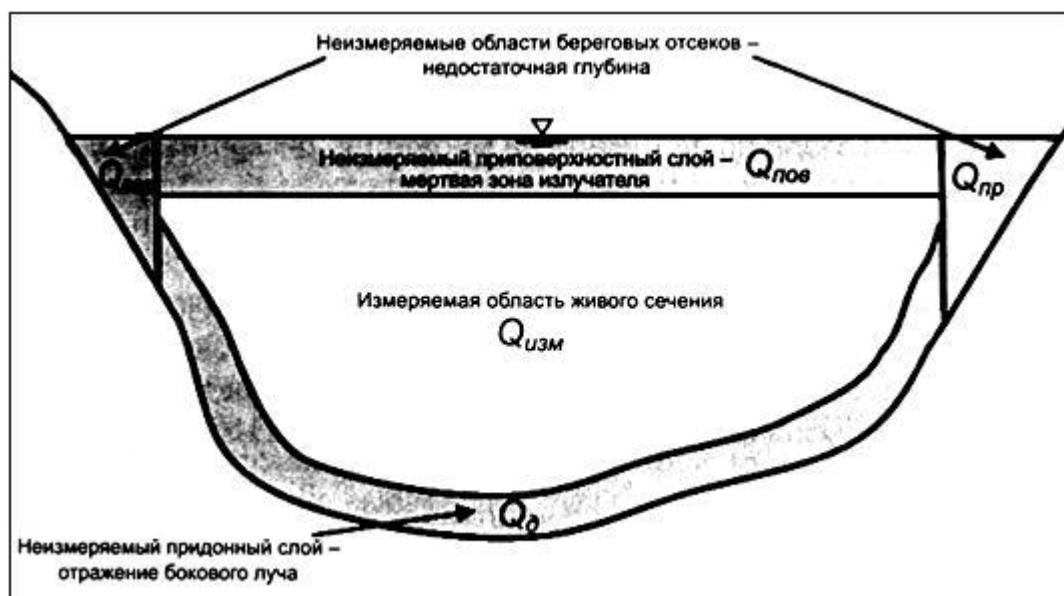
- объект, отражающий сигнал, перемещается с водным потоком с той же скоростью;
- все четыре луча датчика выполняют измерения в одинаковых условиях.

Профилограф измеряет движение воды относительно датчика. Чтобы получить действительную скорость движения потока, скорость движения самого датчика (или судна, на котором он расположен) должна быть исключена. Привязка профилографа, измеряющего скорость движения относительно дна, называется "Bottom Tracking" (BT). Действительная скорость воды вычисляется как разность скорости, измеренной в "ячейке глубины", и скорости перемещения датчика профилографа относительно дна.

При пересечении поперечного сечения водотока выполняется вертикальное профилирование скоростей течения и глубин потока. Расход воды вычисляется суммированием расходов каждого ансамбля (вертикального сегмента с группой данных). Количество "ячеек глубины" в вертикальном ансамбле, в которых выполняется измерение скоростных компонентов, рассчитывается автоматически в зависимости от максимальной глубины потока, режима профилирования или задается вручную с помощью команды оператора.

Для профилографа "Rio Grande" максимальное количество "ячеек глубины" - 128, а для "Stream Pro" - не более 20.

Измерения выполняются в центральной части поперечного сечения, как показано на рисунке 1. В верхнем и придонном слоях, а также в береговых отсеках, значения скоростей течения определяются расчетным путем.



Метод расчета расходов в береговых отсеках следует задавать в программе "WinRiver II" согласно указаниям в зависимости от формы (геометрии) берегового отсека.

Для использования профилографов "Stream Pro" и "Rio Grande" следует задавать степенной закон распределения скоростей по вертикали с показателем степени $1/6$.

1.3 Интеграционные методы

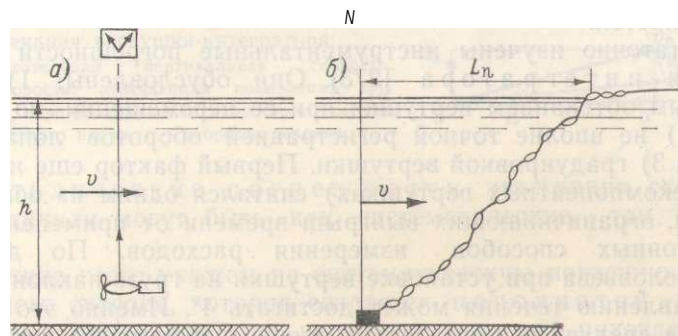
Существует две разновидности интеграционного метода измерения средней скорости на вертикали:

а) перемещение прибора-интегратора от поверхности ко дну и обратно с регистрацией суммарного числа оборотов вертушки;

б) выпуск поплавков-интеграторов (пузырьков газа или капель масла) со дна потока и определение расстояния их сноса на поверхности воды;

Наиболее распространен и технически отработан первый вариант. Его впервые применили И. И. Ревы в 1870 г. на реках Южной Америки, А. Р. Гарляхер на Эльбе и Дунае. В России первые измерения расходов воды интеграционным способом были произведены на р. Сухоне в начале 80-х годов прошлого столетия. Позже серии сравнительных измерений точечными и интеграционными способами проводились Н. Н. Жуковским на Волге (1903 г.), Н. А. Гирилловичем и И. И. Москвитиным на Сырдарье (1915 г.). В годы советской власти разработка интеграционных способов была продолжена Б. А. Симбирским и Н. М. Аксаковым на Сырдарье и И. И. Большасом на Волге. Всесторонние испытания интеграционных способов осуществила экспедиция ГГИ на реках Средней Азии по инициативе О. Н. Борсука.

Для широкого внедрения интеграционных способов требуется специальное оборудование — моторное судно, оснащенное подъемным механизмом и приборами — интеграторами скорости.



Комплект оборудования оказывается особенно сложным при интеграции скоростей по живому сечению. Поэтому в ГГИ был сконструирован облегченный вертушечный интегратор ГР-101.

Поплавочные интеграторы различаются по характеру используемых индикаторов (твердых, жидкостных и газовых), конструкцией пусковых и регистрирующих устройств. Ю. Д. Шариковым испытаны жидкостные интеграторы с буйковой системой и так называемые гидробомбы двойного интегрирования, предназначенные для измерения расходов воды с самолета. В. Э. Вид разработал фотопневматический способ интеграции скоростей.

Достаточно изучены инструментальные погрешности вертушки-интегратора. Они обусловлены: 1) косо-струйным обтеканием вертушки при ее перемещении по вертикали, 2) не вполне точной регистрацией оборотов лопастного винта и 3) градуировкой вертушки. Первый фактор еще недавно (при некомпонентных вертушках) считался одним из основных условий, ограничивающих выигрыш времени от применения интеграционных способов измерения расходов. По данным Н. Я. Соловьева при установке вертушки на грузе наклон ее оси к направлению течения может достигать 4° . Именно это значение угла следует принимать для оценки наибольшей систематической погрешности (завышения скорости). Векторная диаграмма скоростей обтекания позволяет нормировать относительную скорость

перемещения вертушки в зависимости от требуемой точности измерения.

Случайная погрешность измерения скорости связана с погрешностью отсчета числа оборотов. При этом относительная скорость перемещения вертушки для заданной относительной погрешности определяется выражением.

Если принять погрешность равной в среднем 0,5 оборота (для вертушки с сигналом через каждый оборот), то при $K_{\Gamma} = 0,2$ м, относительная скорость перемещения вертушки может быть доведена до 0,2. Иначе говоря, условия регистрации оборотов лимитируют процесс измерения меньше, чем фактор косоструйного обтекания вертушки.

Инструментальная погрешность поплавочного способа связана с непостоянством скорости всплывания капель жидкости или пузырьков газа, неточностью фиксирования точки появления поплавков на поверхности воды и т. п. Составляющие этой погрешности по элементам измерительного комплекса изучены недостаточно.

Методические погрешности интеграции скоростей по вертикали могут быть как систематические, так и случайные.

Прежде всего укажем на систематическую погрешность вертушечного способа, которая создается неполнотой учета скорости в придонном слое, поскольку вертушка никогда не может быть опущена ко дну ближе, чем на половину диаметра лопасти. Существуют различные рекомендации и теоретические схемы для расчета поправок, компенсирующих эту погрешность. Они выводятся на основе теоретических зависимостей для распределения скоростей по вертикали.

Чтобы исключить завышение скорости, иногда предлагают дополнительно выдерживать вертушку у дна в течение некоторого специально рассчитанного промежутка времени. Нам эта процедура

представляется более сложной, чем введение поправки по весьма простой зависимости.

В прошлом, когда применялись грибовидные грузы, из-за плохого обтекания поддона при опускании вертушки получались меньшие значения средней скорости на вертикали, чем при подъеме от дна к поверхности потока. Современными измерениями при стандартных грузах это различие в результатах интеграции не устанавливается. Наибольший вклад в методическую погрешность интеграции скоростей вносит пульсационная составляющая. В каждом из двух разновидностей интеграционных способов проявляется один и тот же источник пульсационной погрешности — турбулентность потока, но механизм взаимодействия прибора и среды принципиально различен. Вертушка-интегратор фиксирует скорости непрерывно набегающих все новых и новых структурных индивидуумов. Поплавок-интегратор сохраняет связь с локальным образованием, в котором он находится в момент выпуска со дна. Статистические характеристики пульсаций изучались Е. А. Быбиным и В. В. Гончаровым (ГГИ) на р. Соже и Большом Ставропольском канале в 1970—1972 гг. Вертушкой-интегратором ГР-101 на характерных вертикалях измерялось 20—30 значений средних скоростей. Интервал дискретности измерения, зависящий от скорости перемещения вертушки и глубины на вертикали. Для оценки случайной пульсационной погрешности интеграции скоростей по вертикали вертушкой нами получена зависимость в которой учитывается влияние характеристик турбулентной среды и скорость перемещения вертушки на точность измерения элементарных расходов, а, не отличается от относительной погрешности интеграции скорости на вертикали.

Поведение поплавков -интеграторов, пускаемых со дна потока, подчинено закону случайных блужданий. Он установлен Тэйлером на основе **исследования одномерной** диффузии в поле стационарной и однородной турбулентности с использованием ее

лагранжевых характеристик. Формально это те же величины дисперсии, автокорреляционной функции и времени корреляции, что и в эйлеровой системе. Однако лагранжевы характеристики менее изучены, так как в жидкой среде трудно проследить движение частицы или фиксированных объемов. Значительно легче это удастся сделать в атмосфере, применяя, например, шары-радиозонды. По результатам изучения атмосферной турбулентности можно заключить, что дисперсия лагранжевых пульсаций существенно не отличается от их эйлеровых величин. Что же касается автокорреляционной функции и времени корреляции, то они существенно различны. По некоторым данным лагранжев радиус корреляции по крайней мере в 4—8 раз больше эйлеровых.

Что касается зависимости для оценки точности измерения элементарного расхода с помощью поплавков-интеграторов, то она аналогична формуле

$$\tilde{\sigma}_q = \tilde{\sigma}_v \sqrt{\frac{2\omega_{пк}^{(L)}}{\hbar}}.$$

Имея в виду соотношение, можно сделать вывод, что погрешность интеграции скорости поплавком в 2—3 раза больше, чем вертушкой-интегратором.

Таким образом, влияние турбулентности потока при интеграции скоростей проявляется в каждом из рассмотренных способов на различной физической основе, что приводит к существенному расхождению результатов измерения. На рисунке представлены отклонения элементарных расходов, измеренных интеграторами, от результатов измерения детальным способом в двух—пяти точках

вертикали с длительной выдержкой вертушки. Рассеяние результатов измерения посредством интегрирующих поплавков (незалитые точки), значительно шире полосы, в которой сосредоточены данные вертушки-интегратора. Обращает на себя внимание одностороннее отклонение точек, относящихся к жидкостным поплавкам В. Е. Русакова. Этот эффект В. Э. Вид объясняет инерционностью поплавков, когда их относительная плотность ρ_0 ненамного меньше единицы. Так, в полевых экспериментах Вида поплавки—теннисные шарики с балластом при $\rho_0 = 0,6-0,8$ — занижали среднюю скорость потока на 13—17 %. Пузырьки воздуха рассеиваются симметрично и дают те же пределы погрешностей измерения, что и вертушка-интегратор. Инерционность поплавков приводит к увеличению случайной погрешности измерения: вопреки формуле она оказывается тем больше, чем меньше скорость подъема поплавков. Иными словами, инерционность интегратора снижает эффект пространственного осреднения мгновенных скоростей по глубине потока. Это происходит из-за того, что за время своего медленного всплытия поплавков проникает турбулентные образования достаточно крупных масштабов, задерживающих или ускоряющих его движение в более широких пределах по сравнению с диапазоном статистического осреднения скоростей, согласно формуле

Точность интеграции скоростей на вертикали вертушкой оценивается совокупной погрешностью

$$\tilde{\sigma}_{vB} = \sqrt{(\tilde{\sigma}_v)_K^2 + \tilde{\sigma}_{vN}^2 + \tilde{\sigma}_{vP}^2 + \tilde{\sigma}_{vIN}^2}$$

которая в обычных условиях при оптимальной организации измерений составляет 3—5%. Погрешность поплавочной интеграции в 1,5—2 раза больше вертушечной.

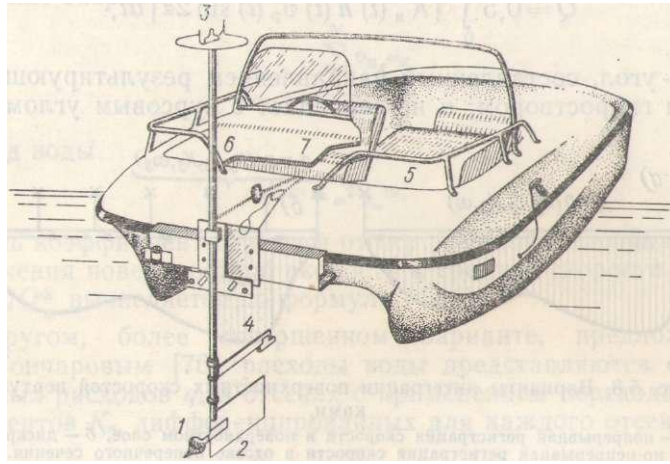
Еще недавно считалось, что интеграция скоростей по вертикали не ускоряет измерения расходов, так как все равно наблюдения остаются многопозиционными, а при работе с плавучих средств не исключаются продолжительные операции установки судов на якоря и снятия с них. В

действительности это не совсем так. Многократные сравнительные измерения, проведенные отделом гидрометрии ГГИ, позволили установить сокращение затрат времени по сравнению с двухточечным способом в зависимости от характера оборудования гидростворов:

Интеграция скоростей по вертикали особенно эффективна при совмещении промерных и скоростных вертикалей (исключается необходимость в предварительной съемке поперечного сечения русла). Лишь при использовании судов такая операция практически нецелесообразна. В этом случае ускорение измерений достигается посредством интеграции поверхностных скоростей вертушкой и промеров глубин эхолотом с движущегося судна.

Измерение расходов воды с движущегося судна (интеграция поверхностных скоростей по ширине потока)

Первое применение вертушки для интеграции скоростей по ширине потока приписывают австрийскому механику Л. Г. Тревиранусу (1850 г.). Позже Прайс использовал этот способ на р. Миссисипи. В нашей стране исторически одной из первых разновидностей интеграции поверхностных скоростей был способ косых галсов, предложенный В. Г. Глушковым в 1918 г. Развивая этот принцип, Г. В. Железняков выдвинул гипотетический вариант своеобразной гидрометрической торпеды — интегратора скоростей, оснащенного эхолотом и автоматом поворота на обратный курс. Однако на практике методы интеграции скоростей по ширине потока получили иные технические решения. Б. А. Симбирский и Н. М. Аксаков в 30-х годах, а в послевоенные годы О. Н. Борсук и В. В. Дементьев много усилий посвятили



разработке так называемого зигзагообразного метода интеграции скоростей вертушкой (он не получил распространения из-за технических трудностей одновременного перемещения прибора по ширине и глубине потока).

В США применяется метод, реализованный Г. Ф. Смутом . Сконструирован специальный катер-катамаран, оснащенный вертушкой, эхолотом и регистрирующей аппаратурой

1.4 Авиаизмерения расходов воды



Широкое использование аэрометодов в гидрологических исследованиях началось в послевоенные годы, главным образом при проведении водных изысканий для дорожного и гидротехнического строительства. Инициатива внедрения авиаизмерений на гидрологической сети принадлежит В. А. Урываеву (ГГИ). Под его руководством разработаны методические основы и технология измерений расходов воды с самолета. Методика речной аэрогидрометрии получила развитие в работах Измерение расходов воды сотрудников ГГИ И. Г. Шумкова, П. Н. Бурцева, В. Ф. Усачева и др. Существуют три основных варианта авиационного измерения расхода воды:

— поплавочный , основанный на измерении поверхностных скоростей течения;

- интеграционный , в котором для определения средней скорости на вертикали служит масло или другая жидкость более легкая, чем вода, истекающая из сброшенных в поток специальных сосудов;
- «гидробомб»;
- метод смешения : расход измеряется по изменению концентрации вещества-индикатора, поступающего в поток из сброшенных с самолета сосудов.

Организация и методика авиаизмерений расхода воды регламентирована в разработанных ГГИ руководствах. В отличие от наземных поплавочных наблюдений, которые требуют длительного времени для последовательных пусков поплавков, воздушное фотографирование в короткий срок воспроизводит все поле поверхностных скоростей по всей ширине русла или его крупномасштабных фрагментов. Поверхностные скорости определяются посредством фотограмметрической обработки аэроснимков в камеральных условиях. Для маркировки течений применяются деревянные поплавки цилиндрической формы. При растворении обмазки на водной поверхности вокруг поплавка образуется ярко-зеленое пятно, которое отчетливо наблюдается с самолета и дешифрируется на аэрофотоснимках. Для метания поплавков с самолета применяется ручной сбрасыватель конструкции ГГИ. Он позволяет сбрасывать 2- 3 поплавка в секунду. Интервал сброса поплавков зависит от ширины реки и назначается таким, чтобы по створу успевали приводниться 12—18 поплавков. На широких реках с поймами водная поверхность маркируется сбросом нескольких десятков поплавков через 50—100 м со сгущением их в основном русле. Интервал времени между двумя аэроснимками выбирается в зависимости от предполагаемой скорости течения и ориентировочно составляет 1—2 мин при $v = 1-1,5$ м/с и 3—4 мин при $v < 1$ м/с. Во всех случаях интервал времени не должен превышать времени «живучести» поплавка с ураниновой обмазкой (10— 15

мин). Геодезическая привязка аэроснимков выполняется заранее, маркированным опорным точкам местности. Наиболее просто эта задача решается на относительно нешироких реках, когда на аэроснимке удастся получить изображение обоих берегов и для определения расхода воды достаточно двух снимков с интервалом времени. На широких реках с затопляемыми поймами прибегают к маршрутному фотографированию. Первое и второе положение поплавков при этом фиксируется двумя сериями перекрывающихся снимков. Для их взаимной увязки до начала измерений расхода на гидроствор сбрасывают якорные поплавки, которые при обработке аэроснимков выполняют роль опорных точек. Высота сброса поплавков обычно меньше высоты фотографирования и принимается равной 100 м при скоростях потока менее 0,5 м/с. Когда $u > 0,5$ м/с высота сброса поплавков определяются в зависимости от высоты фотографирования.

Авиационный вариант метода смешения испытан ГГИ и лабораторией аэрометодов Мингео (бассейн р. Кубани, 1974 г.). Концентрация раствора уранина определялась специально сконструированным телефотометром. Испытания дали отрицательный результат: из-за неполноты перемешивания индикатора погрешность измерения расхода достигала 70%. Для усовершенствования методики и техники авиационного варианта метода смешения необходимо разработать многоканальный телефотометр, который смог бы регистрировать поле неравномерного распределения индикатора по длине и ширине потока. В методическом и организационно-техническом отношении авиаизмерения значительно сложнее наземных. Соответственно усложняется и оценка точности получаемых результатов. Погрешности, специфичные для аэрометодов, могут быть подразделены на две группы, относящиеся к процессам: 1) аэрофотосъемки, дешифрирования и трансформирования снимков; 2) локализации измеренных элементов расхода воды. Первая группа погрешностей обусловлена комплексом летно-съемочных и камеральных операций. Точность авиаизмерений, кроме

дешифрирования поплавков или точек выхода индикаторов скорости на поверхность воды, определяется пространственным положением точки аэрофотосъемки относительно объекта — поля поверхностных скоростей или элементарных расходов q . Наилучшие результаты достигаются, когда эпюры и q симметричны, а точка съемки проектируется на динамическую ось потока. В общем случае при несимметричной модели расхода воды аэрофотосъемка должна выполняться над зоной расположения ее центра тяжести. Вторая группа погрешностей связана с неравномерностью движения потока, при котором его локальные характеристики не совпадают с осредненными по длине величинами.

Основным параметром поплавочного способа служит коэффициент перехода от поверхностной к средней скорости на вертикалях. Считалось, что его надежное определение возможно лишь на основе предварительных наблюдений. Между тем это условие противоречило целевому назначению метода, который и рассчитан для применения как раз там, где наземные измерения трудновыполнимы, особенно при весенних разливах рек и удаленности гидростворов от базовых станций. Достаточная надежность этой зависимости нашла подтверждение в результатах специальных авиаизмерений, выполненных на р. Соже в 1970—1971 гг. Средняя квадратическая погрешность определения расходов составила: 5,5 % при благоприятных условиях летно-съемочных работ и 9,5 % при наличии помех для аэрофотосъемки и ветре. Сопоставление этих оценок и уже приводившихся выше погрешностей других методов приводит к заключению, что более простые схемы авиаизмерений относительно надежнее сложных. Явно предпочтительней других оказываются способы: — поплавочный, основанный на измерении поверхностных скоростей, особенно в сочетании с авиационными методами измерения глубин и съемки поперечных профилей русла; — двойной интеграции посредством гидробомб и выпускаемого из них масла со съемкой точек приведения с

вертолета или без нее — при достаточных скоростях потока. При оптимизации параметров летно-съемочного комплекса достигается точность, близкая к результатам наземных измерений. Особенно перспективны интеграционные способы, так как они позволяют полностью отказаться от наземных измерений уровней воды и площадей живого сечения.

1.5 Измерения поверхностными поплавками

Точность поплавочных измерений существенно ниже, чем вертушечных, поэтому поверхностные поплавки применяются при рекогносцировочных обследованиях рек, вы- ходе вертушек из строя. При интенсивном ледоходе, когда вертушечные измерения становятся невозможными, в качестве поплавков служат отдельные льдины. Чтобы избежать влияния ветра на точность измерения расхода воды, поплавочные наблюдения проводят при штиле или небольшом ветре — 2—3 м/с. На больших реках поплавочные измерения могут производиться при скорости ветра до 5 м/с при условии ее измерения анемометром для введения соответствующих поправок. Для измерения расхода воды поверхностными поплавками выбирается прямолинейный участок реки с однообразными глуби- нами, шириной и продольным уклоном водной поверхности на протяжении трех — пятикратной ширины реки. По берегу параллельно основному направлению течения прокладываются магистраль и перпендикулярно к ней разбиваются три створа: верхний, средний и нижний. Расстояние между крайними створами назначается таким, чтобы продолжительность хода поплавков между ними была не менее 20 с. Если на участке имеется гидрометрический створ, то он обычно служит средним створом, а верхний и нижний створы разбиваются параллельно ему на равных расстояниях. В 5—10 м выше верхнего створа назначается пусковой створ , с которого при измерении скорости течения пускаются поплавки с таким рас- четом, чтобы при подходе к верхнему створу поплавков принял скорость той струи потока, которая его перемещает. На реках шириной до 100 м в средних створах натягиваются как

можно ниже над водой тонкие стальные канаты. Положение верхнего и нижнего створов закрепляют вешками. Канат, натягиваемый через средний створ, размечается хорошо заметными с берега метками (например, свешивающимися с троса цветными полосками материи), которые служат для промера глубин и для определения мест прохождения поплавками створа. На широких реках, где пользоваться канатами неудобно или затруднительно, створы закрепляются вехами, а место пересечения поплавком среднего створа и положение промерных точек определяется засечками с берега угломерным инструментом. Измерение скорости поверхностными поплавками состоит в определении времени прохождения ими расстояния от верхнего до нижнего створа и мест прохождения через средний створ. В пусковом створе забрасывается с берега или пускается с лодки первый поплавок, и в момент прохождения им верхнего створа по сигналу наблюдателя, стоящего в этом створе, техник пускает секундомер. В момент пересечения поплавком среднего створа отмечается место его прохождения от постоянного начала по размеченному канату или засечками с берега угломерным инструментом. Засечка поплавок производится в момент подачи сигнала наблюдателем, стоящим в среднем створе. На мензуральном планшете техник ставит черточку на линии створа и около неё записывает номер поплавок. При прохождении поплавком нижнего створа по сигналу наблюдателя, стоящего у этого створа, техник останавливает секундомер. Следующий поплавок пускается на некотором расстоянии от первого, и вся работа по измерению скорости течения повторяется в том же порядке. Всего пускается 15—20 поплавков, равномерно распределенных по ширине реки. Вместо визуальных засечек местоположения поплавков, может быть использована фотосъемка их специальным фотоаппаратом. Фотоаппарат размещается в этом случае в наиболее высоком месте берега или на специальной вышке с таким расчетом, чтобы снимком захватывалась вся ширина реки. Если невозможно пустить поплавки по всей ширине реки, например на реках с быстрым течением, где поплавки сносятся к се-

редине

потока, расходы воды определяются по наибольшей поверхностной скорости. В этом случае на стрежневую часть потока пускается 5—10 поплавков. Из всех пущенных поплавков выбираются три поплавок с наименьшей продолжительностью хода, отличающиеся друг от друга по времени не более чем на 10 %; при большем отклонении продолжительности хода пускается еще пять-шесть поплавков. Запись результатов измерения расходов воды поплавками ведется в книжке КГ-7М (н). Для определения скорости течения строится график продолжительности хода поплавков, на котором по горизонтальной оси откладываются расстояния от постоянного начала до места прохождения поплавками среднего створа, а по вертикальной оси — продолжительность хода поплавков между верхним и нижним створами. По нанесенным точкам проводится осредненная эпюра распределения продолжительности хода поплавков по ширине реки. В местах перегибов эпюры, а при плавной её форме через равные расстояния назначается не менее пяти-шести скоростных вертикалей, которые для удобства обработки совмещаются с промерными вертикалями. Для каждой скоростной вертикали вычисляется поверхностная скорость течения путем деления расстояния между верхним и нижним створами на продолжительность хода поплавок, снятую с эпюры. Умножая площади отсеков между скоростными вертикалями на полусумму поверхностных скоростей на них, получают частичные фиктивные расходы воды. Фиктивным он назван потому, что получен по данным о поверхностных скоростях и завышен по сравнению с действительным расходом.

1.5 Измерения поверхностными и глубинными поплавками

В речной гидрометрии применяются преимущественно поверхностные полавки, но в отдельных случаях применяют также глубинные полавки и полавки-интеграторы. Последние применяют в настоящее время при измерениях расхода воды с самолета. Существуют еще двойные полавки,

которые применяются в основном для изучения течений на морях, а также на озерах и водохранилищах; о них будет сказано в разделе VIII. Ранее применялся еще один вид поплавков — гидрометрические шесты; в настоящее время они почти вышли из употребления. Широко применяются различного рода поплавки при проведении научных исследований как в натурных, так и особенно в лабораторных условиях. Иногда в качестве поплавков используют жидкий индикатор — раствор краски или радиоактивный изотоп. Поверхностные поплавки применяются для измерения скоростей и направлений течений на поверхности. Эти поплавки изготовляют обычно из дерева. Для рек шириной до 100 м можно делать поплавки в виде кружков, отпиленных от сухого бревна ; толщина их 3—5 см, диаметр 15— 25 см. Для рек шириной 100—300 м поплавки изготовляют в виде крестовин из досок ; для лучшей видимости их иногда снабжают флажком, а для устойчивости снизу подвешивают грузик. К недостаткам поверхностных поплавков следует отнести ограниченность их применения в ветреную погоду, особенно при небольших скоростях течения, менее 0,5 м/с. При ветре скоростью более 6 м/с применять поверхностные поплавки не рекомендуется. Следует учитывать некоторые особенности работы с поплавками: 1) при подъеме уровня воды в реке наблюдается отклонение траекторий движения поплавков от середины потока к берегам (при спаде явление обратное); в этом случае возможна ошибка в определении длины пути поплавок, если она определена как расстояние между створами, тогда как она больше этого расстояния; 2) при измерении скоростей поплавками полученная в каждом случае скорость течения есть средняя скорость на траектории поплавок; эта скорость принимается за местную скорость в точке пересечения линии створа и траектории поплавок. Действительная местная скорость в этой точке может отличаться от измеренной поплавком.

Глубинные п о п л а в к и применяются для измерения скорости и направления течения на некоторой глубине. Глубинный поплавок состоит из двух связанных нитью или тросом поплавков, из которых верхний находится

на поверхности воды, а нижний— на заданной глубине. Верхний поплавок делается намного меньше нижнего (глубинного) и является только указателем, поэтому скорость движения всей системы приблизительно равна скорости течения на той глубине, на которую погружен нижний поплавок.

Поплавки-интеграторы применяются для определения средней скорости течения на вертикали. Поплавки погружают на дно, затем в определенный момент выпускают, и он начинает всплывать. Подъем поплавка-интегратора со дна на поверхность происходит под действием силы Архимеда. Под действием скорости течения поплавки сносится вниз по течению.

Применение радиоактивного индикатора для измерения скоростей течения. Этот способ основан на том же принципе, что и измерения поплавками: скорость определяется по времени прохождения раствором индикатора расстояния от места выпуска до места расположения датчика, регистрирующего присутствие индикатора. В качестве поплавка здесь используется облако раствора индикатора. Данный способ применяется преимущественно для измерений малых скоростей течения, а также для измерений в потоках, имеющих очень малые размеры, т. е. в условиях, в которых вертушечные измерения невозможны. Этим способом можно измерять скорости движения: талой воды по склону при снеготаянии, воды в почвах и грунтах и др. Поплавочные измерения в настоящее время широко применяются в лабораторных исследованиях: при изучении скоростного поля потоков, различных гидравлических явлений, гидротехнических сооружений и т. д. Эти исследования проводят в гидрологических лотках со стеклянными стенками, что позволяет вести наблюдения за пущенными в воду поплавками как на поверхности, так и в толще его. В качестве поплавков применяют обычно шарики из эмульсии с удельным весом, равным удельному весу воды. Выпуск шариков производят с помощью специальной трубки; каждый шарик выпускается в той точке потока, где это необходимо. Движение шарика в потоке точно воспроизводит траекторию

соответствующей струйки. Кроме эмульсионных шариков, применяют шарики из пластических веществ с удельным весом, равным удельному весу воды. Движение шариков регистрируют с помощью фото- или кино- съемки. Обработка полученных снимков или кинограмм дает возможность определить скорость движения воды на различных участках и направление траекторий струй.

1.6 Особенности измерения расходов воды в различных условиях

В общем случае эти условия изменяются по мере смены фаз режима реки. Между тем часто положение гидроствора остается одним и тем же во все сезоны: и в паводок, когда река становится мощным потоком, и в межень, с наступлением которой она все больше походит на ручей. Такой консерватизм не способствует улучшению измерений. Не надо бояться изменять положение гидроствора и, если потребуется, удалять его от места измерения уровня воды, лишь бы не допустить ухудшения условий измерения. В многорукавных руслах и на поймах рек при измерениях иногда пропускаются отдельные протоки и части живого сечения, а расход воды оказывается заниженным. Происходит это вовсе не потому, что бывает заранее не известна сложная ситуация на участке наблюдений, а из-за необорудованного гидроствора и недостатка соответствующих плав-средств. Один из основных факторов, определяющих точность измерений, — положение скоростных вертикалей. Их следует перераспределять, приводя в соответствие с изменяющейся структурой потока. На горных реках с блуждающим руслом целесообразно совмещать промерные и скоростные вертикали, чтобы всячески ускорить измерения. Это достигается интеграцией скорости на вертикали. Правильное размещение скоростных вертикалей особенно важно при деформациях и зарастании русла, ледоставе и ледяных образованиях. При ледоставе измерения расходов воды начинаются лишь с того момента, когда толщина льда достигнет 10 см. На каждой скоростной и промерной вертикали измеряется общая глубина,

толщина погружения льда и шуги. На реках с устойчивым руслом и при отсутствии шуги промеры глубин можно производить не при каждом измерении расхода воды. Толщина погруженного льда на промерных вертикалях в этом случае определяется интерполяцией между измеренными значениями ее на скоростных вертикалях. При каждом измерении расхода воды устанавливается расстояние от постоянного начала до урезов нижней поверхности льда, а расстояние до урезов воды определяется по профилю створа. Расчет глубин точек для измерения скорости течения производится по рабочей глубине, которая вычисляется как разность общей глубины и толщины погруженного льда. В зашугованном русле рабочая глубина равна расстоянию от дна до нижней поверхности шуги. При ярусном ледяном покрове отдельно измеряется расход воды в каждом потоке между прослойками льда. При малых скоростях течения, когда измерение вертушкой становится невозможным, гидроствор переносится на участок с большими скоростями. Чтобы избежать трудоемкой операции по пробивке лунок больших размеров, для опускания вертушки следует применять рычажно-поворотное устройство. Оно позволяет опускать вертушку в вертикальном положении в лунку диаметром всего 15 см. На зашугованных реках измерение зимних расходов связано со значительными трудностями из-за скопления подледной шуги и малых скоростей течения. Летний гидрометрический створ может оказаться не пригодным для измерения расходов воды зимой. Чтобы правильно выбрать место для зимнего створа, производится рекогносцировочное обследование участка реки протяженностью 7—10 В (где В — ширина реки) с нивелированием водной поверхности для определения продольного уклона. Гидрометрический створ следует устраивать на середине участка с большим уклоном, где обычно скапливается меньше шуги и скорости течения достаточны для их измерения с необходимой точностью. Следует учитывать форму залегания шуги. Не следует выбирать створ там, где из-за шуговых скоплений русло реки разбивается на несколько рукавов. Форма залегания шуги в течение

времени может изменяться, поэтому промерные работы производятся при каждом измерении расхода воды. Количество промерных и скоростных вертикалей назначается большим по сравнению с периодом свободного русла. Если русло реки разделено шугой на несколько частей (рукавов), то в каждой из них назначается не менее трех скоростных вертикалей. В летнее время значительные помехи создает зарастание русла. Перед каждым измерением расхода воды должна выкашиваться водная растительность по всей ширине реки на протяжении 5—10 м выше и ниже створа. На реках с неустойчивым руслом промеры глубин следует производить при каждом измерении расхода воды дважды — до и после измерения скоростей. При значительных изменениях в рельефе дна назначаются дополнительные вертикали или положение постоянных вертикалей изменяется так, чтобы была обеспечена необходимая точность измерений. Весьма важно систематически следить за направлением течений в гидростворе, так как при деформации русла условия протекания воды могут измениться и появиться косина струй. Если она превышает 10° , направление гидроствора нужно изменить или перенести его на участок с более устойчивым руслом. В период весеннего половодья измерение расходов воды представляет особую важность, так как от количества измеренных, расходов и освещенности ими вышних уровней будет зависеть точность вычисления стока воды за год. При высоких уровнях измерения расходов воды обычно связаны со значительными трудностями, поэтому необходимо заранее подготовиться к ним. Прежде всего надо заблаговременно расчистить створ в пойме от кустарниковой и луговой растительности, проверить надежность створного оборудования и плавсредств. Если возможны значительные трудности при промерах глубин, следует заранее пронивелировать пойму и незадолго до вскрытия произвести тщательные промеры в русле реки. Определение расходов в этом случае ограничивается только измерением скоростей течения. Следует своевременно позаботиться о разбивке створов для измерения скоростей течения поплавками или по плывущим льдинам, когда

применение вертушек в условиях ледохода станет невозможным. Свою сложность имеют измерения минимальных расходов из-за малых скоростей и глубин потока. Радикальной мерой в таких случаях следует считать канализацию реки, т. е. сосредоточение потока в одном русле, что делается далеко не всегда. По этой причине, несмотря на кажущуюся легкость измерений малых расходов, они бывают не точны. Значительное влияние на точность измерения расходов оказывают способы подвески грузов и вертушки при измерении скоростей течения. Все методисты сходятся в одном — штанга всегда предпочтительней каната с грузом, так как она не создает подпора, занижающего показания вертушки. Поэтому следует всячески расширять использования штанг, применяя оттяжки и другие приспособления, чтобы обеспечить возможность их удержания. Известно, что в Швейцарии предпочитают штанги даже при скоростях течения около 5 м/с. Отсюда вовсе не следует, что вопреки многообразию гидравлического и руслового режима рек должны использоваться одни и те же средства измерений. В этом смысле весьма показательны сравнительные измерения меженных расходов с лодки и дистанционной установки ГР-70, проведенные А. К. Артемовым (Дагестанская ЗГМО), А. А. Дементьевым и А. М. Шулепиным (Мурманское УГКС). Обнаружилось, что при жестком креплении вертушки на грузе установка ГР-70 занижает расходы воды в среднем на 6—8 % против результатов измерения с люльки или лодки.

II. Теоретические основы измерения скоростей течения пузырьками

Измерение скорости течения при помощи восходящих пузырьков

С помощью давления водяного столба он (механизм) измеряет общее движение течения почти так же как поплавков, действуя за счет прямого движения, чтобы измерить общее течение без погрешности. Движение может быть установлено мобильно для калибровочных или контрольных целей или жестко для продолжительного измерения среднего течения. Предпосылкой для измерения является то, что пузырьки идут со дна, создавая объемное перемещение в толще воды с помощью объединенной визуальной системы наблюдения (например, видеокамера).

Визуальное измерение средней скорости течения в рамках непрерывного движения содержится в главе

Принцип измерения: пузырьки, поднимающиеся со дна, подчинены направлению течения. Пузырьки поднимаются на каждую высоту в поперечном профиле в соответствии со скоростью, присущей данной позиции – это означает что горизонтальное перемещение (дрейф) с начального пункта на дне до всплытия на поверхности воды отражает пространственное разделение скорости в поперечном сечении. С точки зрения измерения горизонтальное восхождение пузырьков может быть измерено вручную либо на камеру.

Основные положения с точки зрения физики: измерение среднего течения с помощью пузырьков призвано упорядочить движение с помощью интегрированных поплавков. Основная мысль о движении пузырьков была развита водными службами Венгрии в начале 20го века. Тогда поплавками служили полые тела из пробки или дерева, которые на своем пути от дна к поверхности воды плыли по течению. В развитии этих процессов принимали участие Бернадский, Колупайла, Витольс, Бехельф. Дж. Тон.

Рассмотрим на рис. скорость $v(y)$ водных частиц в вертикальном измерении составляет расход q бесконечно малых сегментов среднего течения в поперечном разрезе.

$$q = \int_0^h v(y) dy$$

Где:

q – расход ($\text{м}^3/\text{с}$)

v – скорость течения ($\text{м}/\text{с}$)

y – уровень воды (м)

для восходящей скорости пузырьков действует формула:

$$u_s = \frac{du}{dt} \text{ или } dy = u_s dt$$

Где:

u_s – восходящая скорость пузырьков (м/с)

t – время восхождения(с)

Скорость $v(y)$ в точке y может быть описана по всплытию пузырьков s ко временной точке t

$$v(y) = \frac{ds}{dt}$$

$$Q = u_s \int_0^b s(b) db = u_s \cdot S$$

Где:

b – ширина реки (м)

u_s – скорость всплытия (м/с)

S – площадь поверхности (м²)

Общее среднее течение прямо пропорционально площади поверхности (S). Эта поверхность может быть сфотографирована для оценки ее размеров. Также на поверхности воды может быть установлен плавучий измерительный квадрат известных размеров. Пузырьковая эпюра может наблюдаться с помощью глазомерной съемки водной поверхности в лотке. В настоящее время используется видеокамера.

Существенной предпосылкой применимости формулы является постоянная скорость всплытия пузырьков на пути от места их образования на дне до поверхности воды, а так же достаточное число пузырьков на единицу времени. Тогда пузырьковая эпюра может быть отчетливо идентифицирована. На рис показаны результаты измерений скорости поднятия пузырьков в дистиллированной проточной воде. С увеличением эквивалентного значения d_q скорость всплытия зависит от размера пузырька.

Очень маленькие пузырьки при всплытии сохраняют жесткую шарообразную форму. С увеличением размера пузырька он принимает эллипсоидно-подобную форму.

С еще большим нарастанием эквивалентного размера пузырька его форма может меняться от «завернутого» эллипсоида до формы «зонтика». Если растет размер пузырька, то растет и скорость всплытия.

Решающим в использовании пузырьков при интеграционном измерении среднего течения является понимание того, что размер пузырьков от 3 до 10 мм, эквивалентный скорости всплытия u_s , является почти постоянным. На практике размер пузырька приблизительно 4.5 мм.

На практике для расчета скорости всплытия учитывается влияние температуры воды, ее плотности и содержание в ней различных веществ.

Особая сложность измерения среднего течения воды с помощью пузырьков состоит в образовании пузырьков. Для отчетливого пузырькового следа на поверхности воды пузырьки должны образовываться в достаточном количестве на единицу времени. Система VISAB (пункт 5.8) выдает 4 пузырька в секунду, что отвечает частоте 4 Гц. Для необходимого размера пузырька используются определенные насадки, а так же можно установить давление, которое регулируется с помощью вентиля.

Измерение среднего течения воды: система образования пузырьков (от 40 до 50 насадок на погонный метр) должна быть зафиксирована на дне над шлангом с воздухом. Херши (2009) советует использовать шланг толщиной 20 мм и длиной 20 м.

Первые крупные опыты показали, что главной проблемой при установке оборудования на большой воде является не прокладывание пузырькового шланга, а разметка его положения на дне. Всплывающие пузырьки визуально хорошо распознаются с помощью светоотражателя. Их положение может определяться с помощью камеры. Зная положение системы подачи

пузырьков, можно построить различные вертикальные эпюры и при известной скорости всплытия пузырьков точно определить скорость течения.

Сферы использования: измерение средней скорости течения с помощью пузырьков может использоваться в водоемах до 50 м шириной. В случае, если ширина водоема более 50 м, необходимо разделить систему на несколько сегментов.

В 2009 году Херши [] успешно использовал данную технику в Великобритании.

Метод имеет множество достоинств, в том числе наглядность и низкую стоимость приборов.

Недостатками являются возможность образования на поверхности воды пены или волн.

Устройство обладает высокой точностью, неточности состоят лишь в изменении формы пузырьков.

К этому методу измерения был интерес с 70 по 90 гг 20го века, потом угас, но потом снова возобновился с появлением камер высокого разрешения.

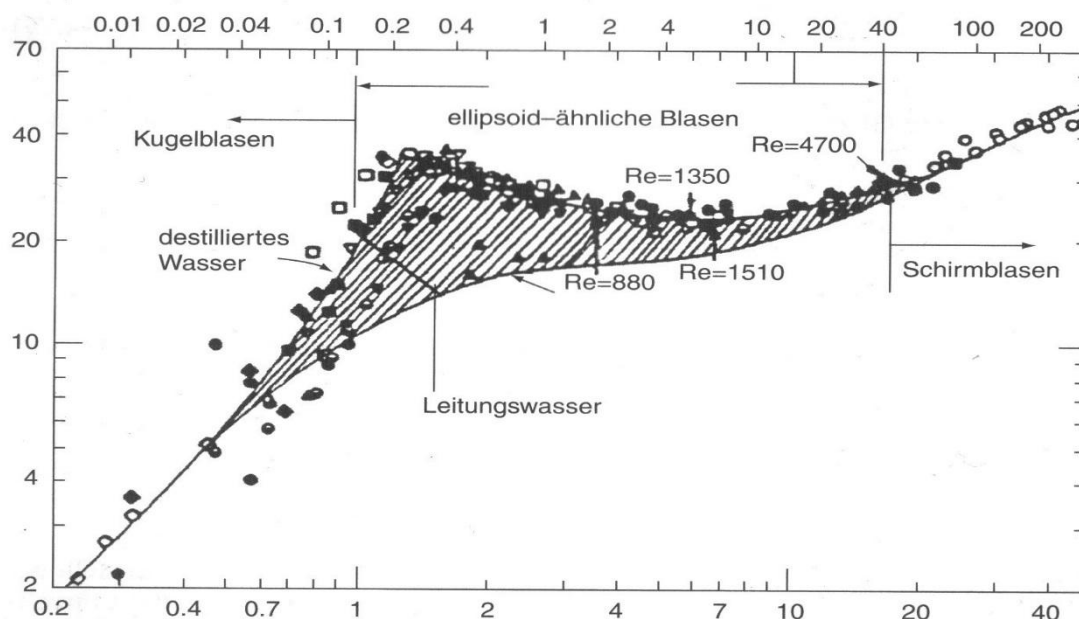


Abb. 4.121 Aufstiegsgeschwindigkeit u_r von Luftblasen in Wasser bei 20 °C (Clift et al 1978)

III. Практическое применение пузырькового способа на реке Оредеж

3.1 Физико-географическое описание реки Оредеж

Река Оредеж, правый приток Луги, вытекает из небольшого водоема в месте выхода ключей на южном склоне Ижорской возвышенности и впадает в Лугу на 196-м км на уровне 32 м. Длина Оредежа 206 км, средний уклон 0,36 м/км. В верховье река прорезает силурийское плато и течет по слабо всхолмленной равнине. Русло умеренно извилистое. Дно песчаное, с отдельными валунами. На отдельных участках - быстрины и перекаты. Средняя ширина реки - 20-40 м. Берега песчаные, луговые, преимущественно крутые, поросшие хвойными и смешанными лесами. В среднем течении - широкие поймы с заливными лугами. В низовье Оредеж протекает через озера Антоново и Хвойлово с широкой поймой и высоким коренным берегом.

Чикино расположено в 179 км от устья, Сиверская - в 155 км, Вырица - в 130 км, Торковичи - в 25 км.

В районе Сиверской из-за подпора Сиверской ГЭС Оредеж широко разлился. От станции до реки около 300 м.

Ниже Оредеж течет по пересеченной местности среди высоких холмов, поросших соснами, и обрывов песчаника. По берегам реки встречается много ключей.

Через 5-6 км на левом берегу покажется деревня Новосиверская. За ней в Оредеж впадает его правый приток речка Орлинка, вытекающая из Орлинского озера. От ее устья начинаются каменистые перекаты. Места здесь очень красивые - Оредеж течет в высоких берегах, вскипая волнами и пенясь на перекатах. Перекаты заканчиваются у устья правого притока - речки Онзы (140-й км).

Дальше на пути - поселок Вырица, вытянувшийся более чем на 12 км вдоль правого берега. На ночлег лучше останавливаться не доходя поселка: далее берега на большом протяжении густо заселены и, кроме того, впереди в поселке плотина, которую надо обносить.

В районе поселка река широко разлилась из-за подпора Вырицкой ГЭС. Обнос по правому берегу (200 м). Ниже перекат под железнодорожным мостом (требует внимания - есть железо в русле).

У деревни Мина Оредеж круто поворачивает на юг, течение его быстрое, в русле отдельные камни. Под мостом на дороге Вырица - Тосно перекат. За 3 км до деревни Введенской встречается несколько перекатов, наиболее сильный из них - не доходя 100-150 м до устья левого крупного притока - реки Суйды (114-й км).

После деревни Большие Слудицы Оредеж становится шире и полноводнее. Последний перекат встречается у деревни Глебово. Самые малонаселенные места начинаются ниже деревни Нестерково. Здесь вплотную подходят леса.

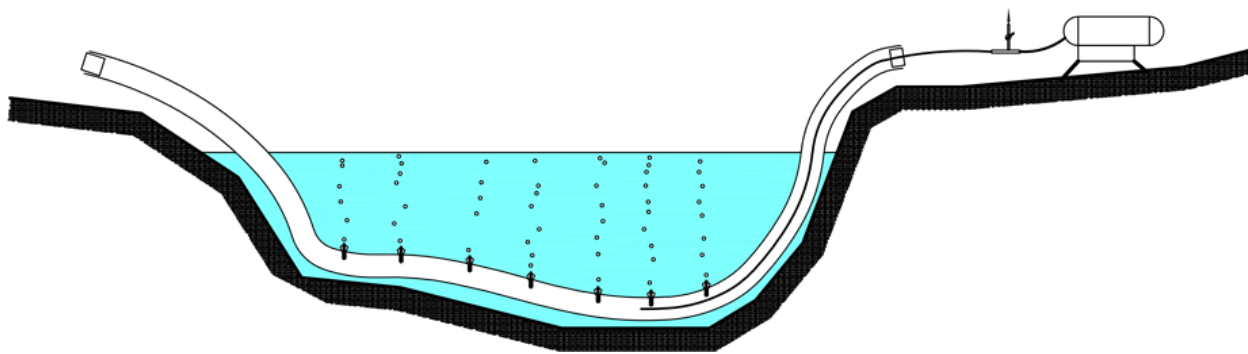
От Тарасино до плотины Нижне-Оредежской ГЭС 16-17 км, однако уже здесь начинает сказываться подпор плотины. Река постепенно разливается

все шире и шире (до 1 км). Затоплен лес. На 66 км в Оредеж впадает его правый приток - река Кременка, а в 3 км ниже стоит плотина самой крупной на реке ГЭС. Обносить плотину следует через дамбу справа от здания ГЭС (60 м). Ниже ГЭС ширина Оредежа 15-20 м, течение слабое, берега постепенно повышаются, лес преимущественно сосновый. Не доходя деревни Никулино, вновь появляются обнажения красного песчаника. Однако стоянок мало, ниже деревни Бор их практически нет.

Пройдя 12 км вниз по течению, на левом берегу стоит старинная деревня Ям-Тесово, в которой есть магазин. Берега озера Тесово, связанного полукилометровой протокой с рекой, густо заселены. Здесь Оредеж течет в широкой долине, делая замысловатые петли. После деревни Бутово, расположенной на высоком левом берегу, Оредеж широко разливается и образует Антоново озеро, длина которого 5,5 км, а наибольшая ширина 600 м. На правом берегу реки в 2 км от берега расположен поселок Торковичи. Против Торковичей в 2 км от левого берега поселок Оредеж. На правом берегу недалеко от воды платформа 125 км железнодорожной ветки СПб – Оредеж.

Пройдя Торковичи, путь держать лучше вдоль левого берега. После двух сужений Оредеж протекает через озеро Хвойлово. Его длина 6,5 км, максимальная ширина 600 м. В 7 км от устья в Оредеж впадает последний правый приток - речка Черная, вытекающая из озера Стречно. В устье Оредеж образует ряд протоков и островов.

3.2 Техническое решение. Описание устройства



Установка представляет собой: установленный на берегу компрессор, который соединён с металлопластиковой трубой, которая уложена на дно реки Оредеж.

К центру трубы протянута силиконовая трубка, соединённая с компрессором. В металлопластиковой трубе сделаны 9 отверстий (жиклёры), через который выходят пузырьки.

Фиксация мест всплытия пузырьков осуществлялась с помощью камеры GoPro3 в режиме фото и видео. Для оценки точности измерений были выполнены параллельные наблюдения вертушки ГР-21М. Результаты наших расчётов вполне удовлетворительны. Мы также проанализировали разброс места всплытия пузырьков во времени.

Как показывает анализ статистической таблицы, разброс между вертикалями весьма существенный. Это связано прежде всего с турбулентными пульсациями. Таким образом, фотографируя пузырьки сразу по всей ширине реки можно изучать турбулентные пульсации сразу во всей реке, а не в точке как это традиционно делается. Кроме того, используя GoPro3 как подводную камеру, можно изучать турбулентность на отдельно взятой вертикали.

3.3 Апробация устройства. Оценка полученных результатов.

№	ур.п.б	1 верт.	2 верт.	3 верт.	4 верт.	5 верт.	6 верт.	ур.л.б.
1		170	216	241	233	174	48	
2		133	257	203	259	171	57	
3		123	224	211	249	128	49	
4		142	213	210	271	138	50	
5		177	216	217	233	147	24	
6		181	259	243	225	138	45	
7		152	191	252	226	133	41	
8		126	214	230	209	136	57	
9		145	222	242	254	149	40	
10		192	288	253	208	134	41	
11		159	265	214	234	143	40	
12		143	232	273	235	122	36	
13		144	227	291	259	135	45	
14		124	222	237	219	126	36	
15		128	213	200	266	140	45	
16		110	195	216	256	155	50	
17		143	165	230	243	162	48	
18		166	209	248	212	157	49	
19		170	208	228	222	159	47	
20		133	235	244	254	153	50	
21		140	197	240	212	145	54	
22		154	200	247	200	136	37	
23		190	239	278	223	158	26	
24		128	210	251	220	153	36	
25		133	205	209	213	145	50	
26		160	174	208	218	161	30	
27		190	205	237	222	124	26	
28		133	209	232	210	142	42	
29		177	245	245	224	156	40	
30		184	202	214	212	164	33	
31		165	243	241	167	156	28	
32		147	271	247	190	145	42	
33		198	268	264	230	169	32	
	Н на верт	196	200	215	212	198	150	
	Vп	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	

	скорости по пузырькам						
№	ур.п.б	1 верт.	2 верт.	3 верт.	4 верт.	5 верт.	6 верт.
1		0,26	0,32	0,34	0,33	0,35	0,16
2		0,20	0,39	0,28	0,37	0,35	0,19
3		0,19	0,34	0,29	0,35	0,26	0,16
4		0,22	0,32	0,29	0,38	0,28	0,17
5		0,27	0,32	0,30	0,33	0,30	0,08
6		0,28	0,39	0,34	0,32	0,28	0,15
7		0,23	0,29	0,35	0,32	0,27	0,14
8		0,19	0,32	0,32	0,30	0,27	0,19
9		0,22	0,33	0,34	0,36	0,30	0,13
10		0,29	0,43	0,35	0,29	0,27	0,14
11		0,24	0,40	0,30	0,33	0,29	0,13
12		0,22	0,35	0,38	0,33	0,25	0,12
13		0,22	0,34	0,41	0,37	0,27	0,15
14		0,19	0,33	0,33	0,31	0,25	0,12
15		0,20	0,32	0,28	0,38	0,28	0,15
16		0,17	0,29	0,30	0,36	0,31	0,17
17		0,22	0,25	0,32	0,34	0,33	0,16
18		0,25	0,31	0,35	0,30	0,32	0,16
19		0,26	0,31	0,32	0,31	0,32	0,16
20		0,20	0,35	0,34	0,36	0,31	0,17
21		0,21	0,30	0,33	0,30	0,29	0,18
22		0,24	0,30	0,34	0,28	0,27	0,12
23		0,29	0,36	0,39	0,32	0,32	0,09
24		0,20	0,32	0,35	0,31	0,31	0,12
25		0,20	0,31	0,29	0,30	0,29	0,17
26		0,24	0,26	0,29	0,31	0,33	0,10
27		0,29	0,31	0,33	0,31	0,25	0,09
28		0,20	0,31	0,32	0,30	0,29	0,14
29		0,27	0,37	0,34	0,32	0,32	0,13
30		0,28	0,30	0,30	0,30	0,33	0,11
31		0,25	0,36	0,34	0,24	0,32	0,09
32		0,23	0,41	0,34	0,27	0,29	0,14
33		0,30	0,40	0,37	0,33	0,34	0,11
Vcp		0,235	0,334	0,330	0,322	0,297	0,139
Среднее		0,235	0,334	0,330	0,322	0,297	0,139
Стандартное отклонение		0,036	0,042	0,031	0,032	0,028	0,030
Минимум		0,168	0,248	0,279	0,236	0,246	0,080
Максимум		0,303	0,432	0,406	0,383	0,352	0,190

Среднее	Стандартное отклонение	Минимум	Максимум
0,293619	0,072620258	0,16	0,3515152
0,295715	0,084105352	0,19	0,3855
0,265494	0,07720358	0,1633333	0,3523585
0,276469	0,076336981	0,1666667	0,3834906
0,267399	0,09417534	0,08	0,329717

дата измерения	Q верт м3/с	Q пуз м3/с	невязка м3/с	невязка %
27.04.2014	5,1	5,3	0,2	3,4
06.05.2014	2,8	3,1	0,4	9,7
09.05.2014	3,0	3,2	0,2	6,3
17.05.2014	5,4	5,7	0,3	5,3

IV. Лабораторные исследования

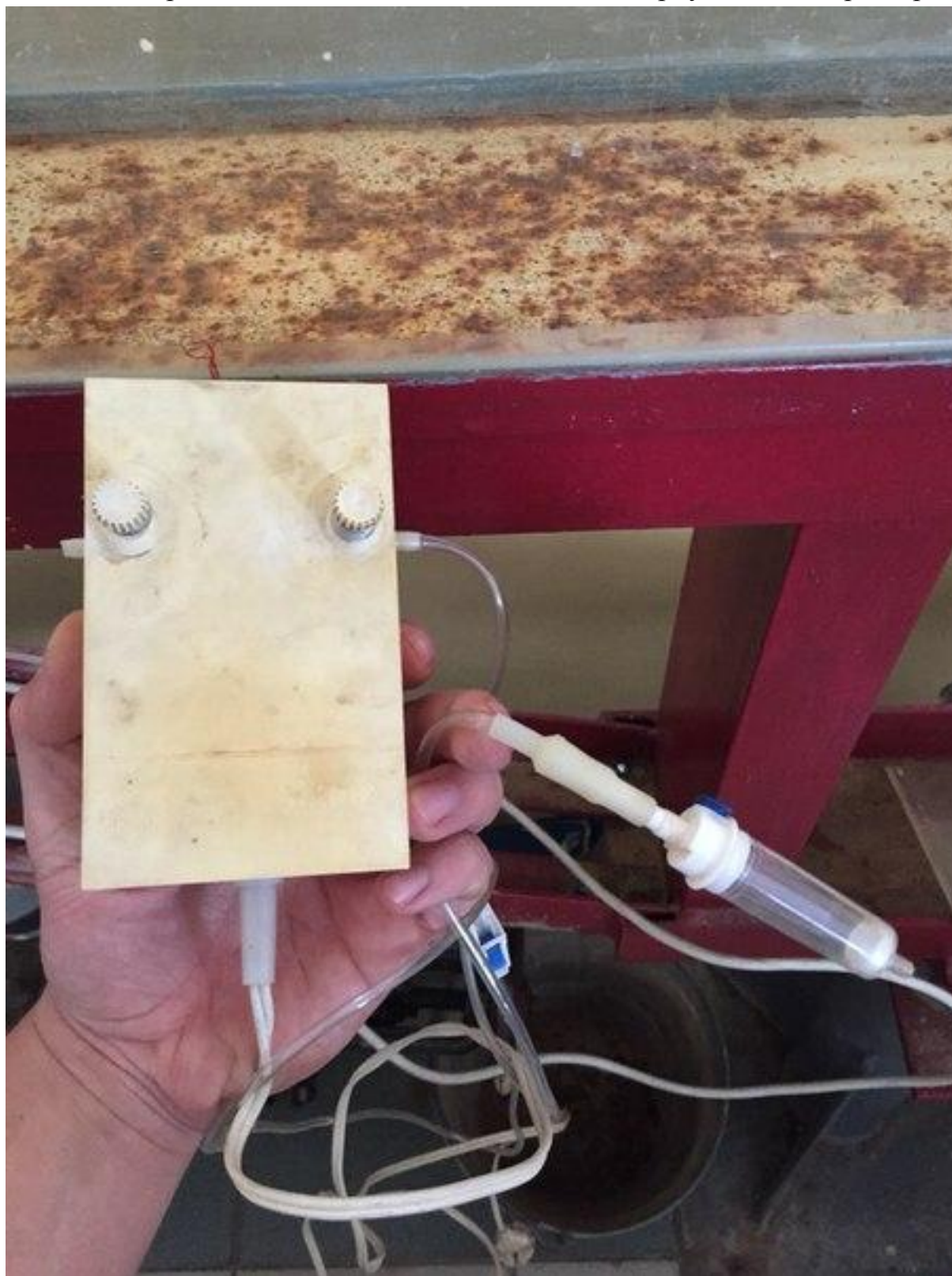
4.1 Описание установки

Лаборатория находится в здании 1 корпуса РГГМУ на кафедре гидрометрии.

В лаборатории имеются несколько видов лотков. Исследования проходят в малом лотке, длиной 6 метров и шириной 25 см. Лоток с переменным уклоном.



Было сконструирована маленькая установка для имитации пузырьков.
Была взята простая медицинская капельница и аквариумный компрессор.



Так же исследования проходили в цилиндрических колбах, так же находящихся в лаборатории РГГМУ



4.2 Описание методики проведения экспериментов

Основной задачей было в лабораторных условиях уточнение определяющих факторов влияющих на всплытие пузырьков.

В ходе исследования было установлено, что диаметр пузырька, температура воды не влияют на скорость всплытия пузырька.



Так же удалось более детально разобраться и уточнить скорость всплытия отдельно взятого пузырька, при помощи современных гаджетов для фото и видео съёмки. При помощи видео съёмки в замедленном режиме удалось проследить конкретно взятый пузырёк и высчитать время его всплытия.



Но стал интересен другой факт! Пузырьки диаметром менее 8 мм имеют при выходе и всплытие чёткую шарообразную форму.



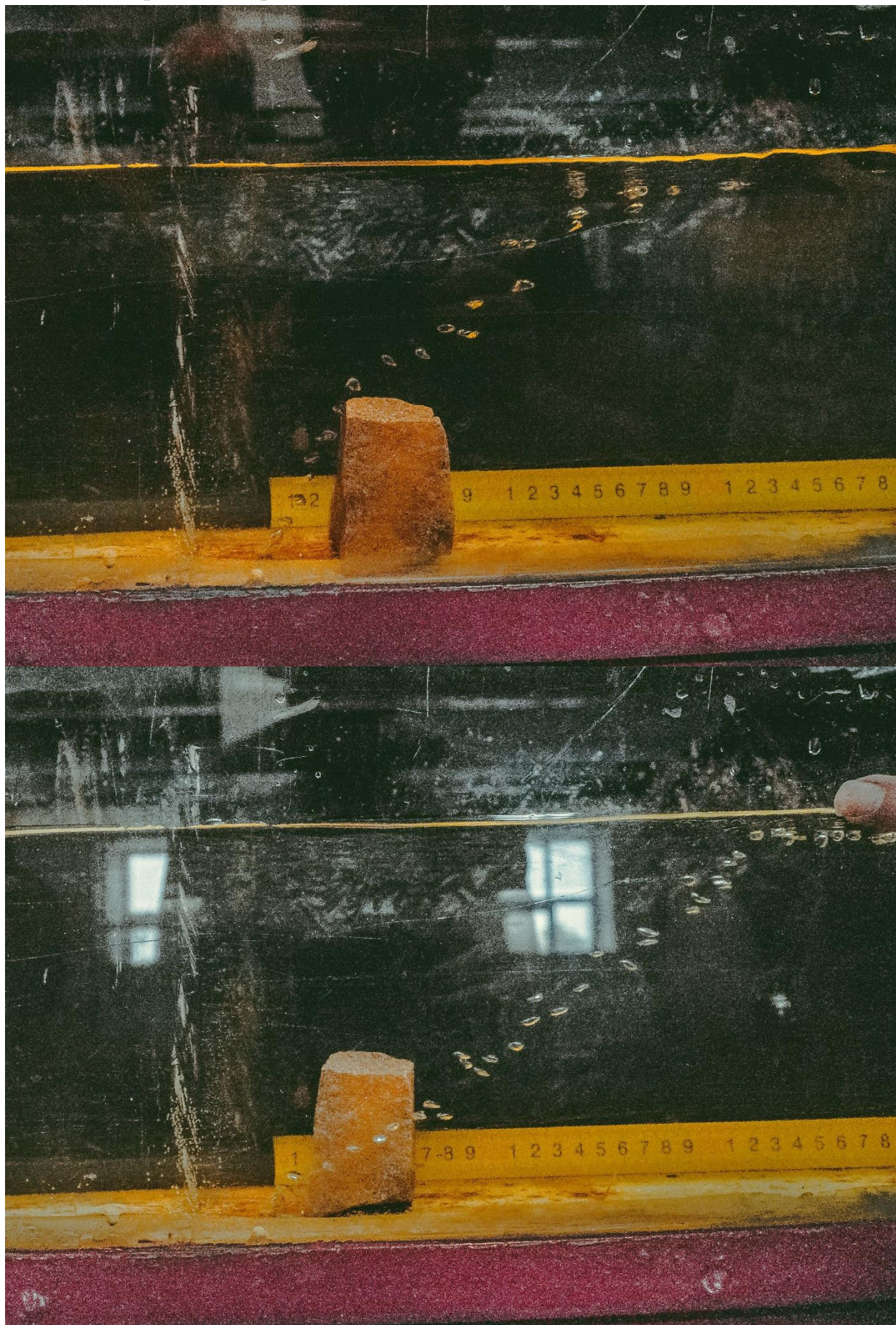
Если же пузырьки будут более 10мм при выходе из отверстия его начинает плющить.

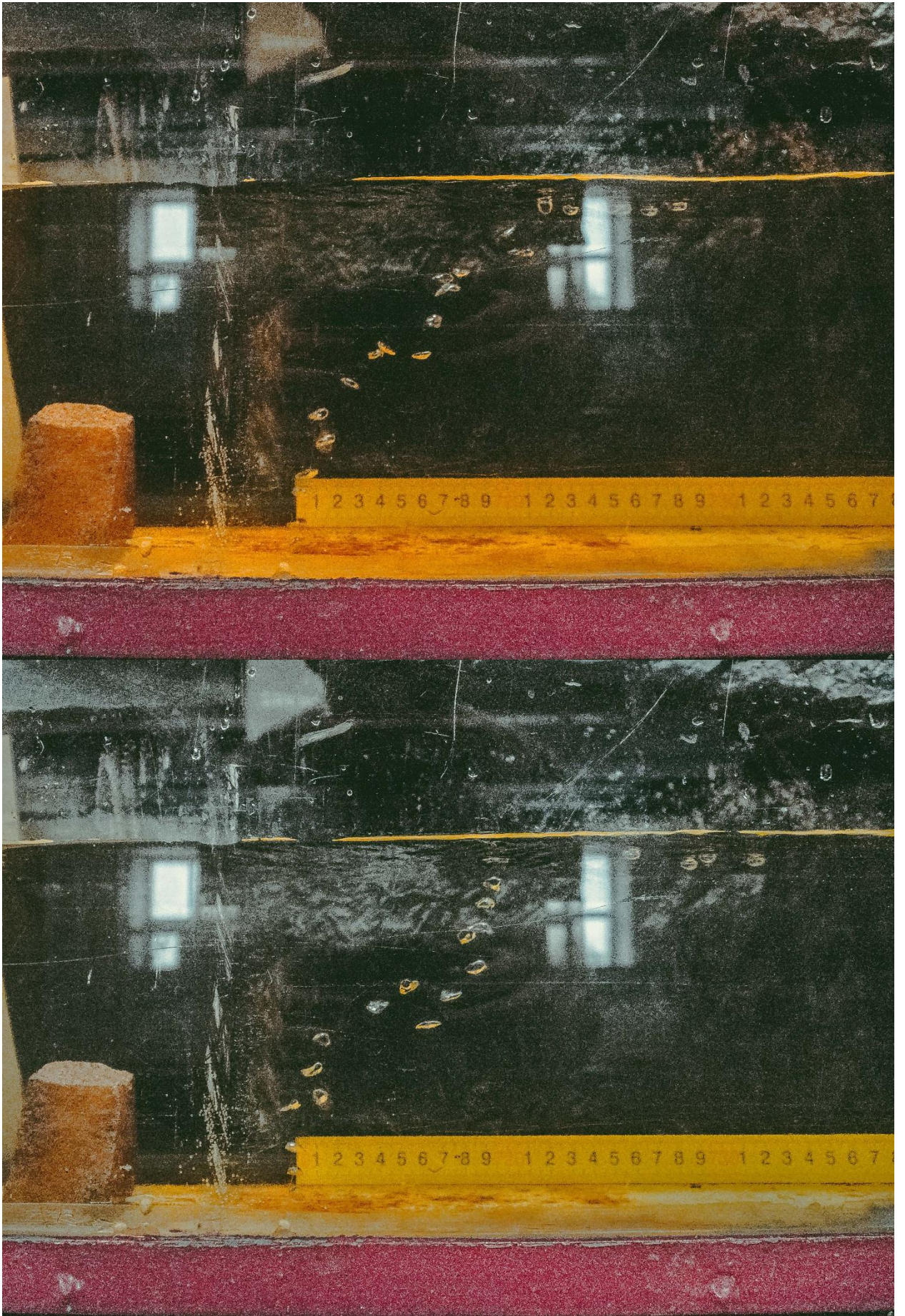


При измерение в лотке, в условиях турбулентного движения пускались пузырьки и фиксировались на фотокамеру для обработки фотографий в автокаде. Параллельно пускались поплавки для измерения поверхностных скоростей течения. При обработке фотографий пузырьков выяснилось, что результаты практически одинаковые.



Так же поигрались с препятствиями

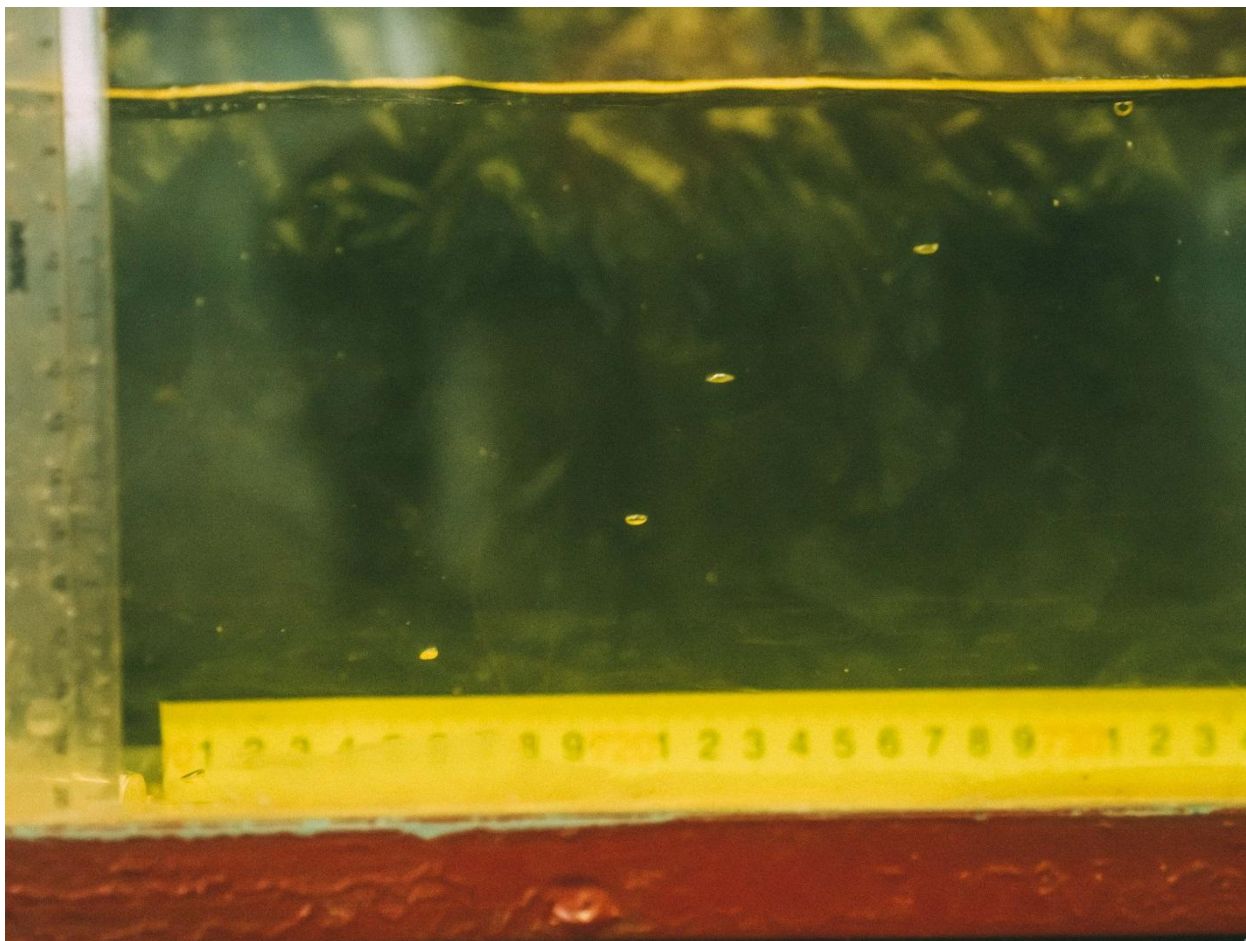




4.3 Анализ результатов измерений

Диаметр пузырька и температура воды не влияет на скорость всплытия.

Если пузырёк более 8мм, начинает принимать формы блины при всплытие.



Заключение

Существует большой интерес к изучению дистанционных методов измерения гидрологических величин. Это вполне объяснимо, потому что дистанционные методы позволяют получать информацию практически в любое время и с минимальным непосредственным участием человека.

Целью моей магистерской являлась разработка сооружения и тестирования установки для измерения расходов воды. А так же в лабораторных условиях уточнение определяющих факторов влияющих на всплытие пузырьков

Установка сооружалась на базе практики РГГМУ в Даймище с 2012 года. За это время было опробовано несколько вариантов установки и выбран наиболее удачный.

Пузырьковый метод имеет множество достоинств, в том числе наглядность и низкую стоимость приборов. Недостатками являются возможность образования на поверхности воды пены или волн.

Судя по полученным результатам, метод является эффективным, но требует дополнительных доработок.

А также существуют огромные перспективы модернизации данной установки, что значительно упростит и улучшит способы измерения расходов воды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Быков В.Д. Васильев А.В. Гидрометрия [текст] Учебник. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 448 с.
2. Карасев И.Ф. Шумков И.Г. Гидрометрия [текст] Учебник. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 381 с.
3. <http://www.elin.ru/1-Wire>
4. http://www.akvilona.ru/brands/hwgroup/model/poseidon_2250.htm
5. <http://www.rusadventures.ru/articles/318.aspx>
6. Статья из немецкой книги по гидрометрии «Измерение скорости течения при помощи восходящих пузырьков»

[Введите текст]