



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: **«Исследование физической модели  
водосбора»**

**Исполнитель:**

Иванов А. А.

(фамилия, имя, отчество)

**Руководитель:**

кандидат географических наук, доцент

(учёная степень, учёное звание)

Исаев Д. И.

(фамилия, имя, отчество)

**«К защите допускаю»**

**Заведующий кафедрой**

(подпись)

кандидат географических наук, доцент

(учёная степень, учёное звание)

Исаев Д. И.

(фамилия, имя, отчество)

*«09» июля 2017г.*

Санкт – Петербург

2017



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

**Исполнитель**           Иванов Андрей Анатольевич  
(фамилия, имя, отчество)

**Руководитель**           кандидат географических наук  
(ученая степень, ученое звание)  
Исаев Дмитрий Игоревич  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

**Заведующий кафедрой**

---

(подпись)

кандидат географических наук, доцент  
(ученая степень, ученое звание)  
Исаев Дмитрий Игоревич  
(фамилия, имя, отчество)

«\_\_\_»\_\_\_\_\_20\_\_г.

Санкт–Петербург  
2017

# СОДЕРЖАНИЕ

## ВВЕДЕНИЕ

### 1 РЕЧНОЙ СТОК И СТОКООБРАЗУЮЩИЕ ФАКТОРЫ

#### 1.1 Физико-географические факторы

#### 1.2 Стокообразующие факторы

#### 1.3 Косвенные факторы

##### 1.3.1 Влияние урбанизации территорий

### 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

#### 2.1 Определение физического моделирование

#### 2.2 Основные принципы физического моделирования

#### 2.3 Применение физического моделирования в гидрологии

### 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 3.1 Описание экспериментальной установки

##### 3.1.1 Создание 3D модели

##### 3.1.2 Монтаж экспериментальной установки

#### 3.2 Программно-аппаратный комплекс

#### 3.3 Методика проведения экспериментов

### 4 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

#### 4.1 Анализ экспериментальных данных

#### 4.2 Построение хронологических графиков

#### 4.3 Расчёт коэффициента стока и времени добегания

#### 4.4 Анализ полученных результатов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Список используемых источников

### Приложение А – Выходные экспериментальные данные

## ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития прогнозирования и различных видов моделирования гидрологического режима и процессов постепенно предполагает все более жёсткие требования к точности и качеству получаемой информации.

Актуальность исследования заключается в разработке оптимальной физической модели единичного водосбора, позволяющей, изменяя основные характеристики водотока и водосбора, смоделировать, а соответственно, и с прогнозировать гидрологический режим водных объектов.

Цель исследования: поиск научно-технических решений, практическое создание и внедрение установки на базе микроконтроллера ATmega328 для физического моделирования процессов возникающих на единичном водосборе после выпадения на него жидких осадков.

Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

1) спроектировать максимально эффективную конструкцию для экспериментальной установки отвечающую следующим требованиям: низкую стоимость, широкий диапазон изменения начальных условий, возможность последующей модернизации, высокую ремонтпригодность;

2) разработать программное обеспечение, позволяющее обеспечить стабильную работу и максимально высокую производительность установки;

3) разработать и создать систему мониторинга количества воды для оперативного контроля процесса проведения эксперимента

Практическая значимость данного исследования заключается в том, что разрабатываемая модель позволит более точно описать процесс образования склонового стока на водосборе водных объектов, что в конечном итоге позволит улучшить качество прогнозов гидрологического режима. Кроме того, проектируемая модель поспособствовала созданию

системы мониторинга интенсивности выпадения осадков, позволяющая оперативно контролировать процесс легирования.

В процессе работы над созданием модели была выполнена тарировка электронных расходомеров.

# 1 РЕЧНОЙ СТОК И СТОКООБРАЗУЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Знание физических основ гидрологических процессов и их связь с географической средой является одной из основных проблем наземной гидрологии. Без понимания механизма и степени влияния физико-географических и климатических факторов на водный режим невозможно правильно применять метод лабораторного моделирования при расчете и прогнозировании речного стока, улучшении существующих и разработке новых методов. Даже прогноз водного режима для существующих моделей должен проводиться с пониманием процессов, происходящих в речном бассейне. Это позволяет отслеживать результаты.

При моделировании процесса стока в русле реки необходимо знать конкретный эффект природных и антропогенных факторов на сток и другие гидрологические характеристики. Оценка этого влияния в качественной форме помогает понять физическую сущность происходящих явлений, а ее представление в количественной форме (графики связи, аналитические зависимости) позволяет провести необходимые вычисления и создать математическую или физическую модель речного бассейна.

Изучение влияния физико-географических и климатических факторов на потоковые процессы позволяет ответить на вопросы о том, как и почему формируется конкретная характеристика потока.

## 1.1. Физико-географические факторы

Весь комплекс физико-географических факторов, которые так или иначе влияют на режим и характеристики речного стока, можно разделить на два типа: климатическую и подстилающую поверхность. Последнее включает антропогенный фактор, который становится все более важным в результате интенсивного развития экономической активности в водосборных бассейнах и руслах рек и, в некоторых случаях, радикального изменения

водного режима. Распределение климатических факторов на территории связано с климатическими зонами и обусловлено характером циркуляции атмосферы, и поэтому оно подчиняется закону географического зонирования. Большинство факторов, лежащих в основе поверхности, имеют локальное распределение по всей территории, поэтому их эффект заметен только там, где сам фактор является большим. Такие факторы относятся к категории азональных. Эти типы факторов включают в себя большое количество компонентов, роль и важность которых при формировании стока могут быть очень разными и даже противоположными, поэтому целесообразно группировать их вместе с генетическим влиянием, идентифицируя три группы факторов. Первая группа включает факторы, которые непосредственно создают факторы стока сточных вод. Во втором - факторы, влияющие на режим и количество стока путем изменения или перераспределения во времени и на территории фондовых факторов. Эту группу факторов можно назвать косвенными факторами. Третья группа включает в себя определенные факторы, связанные с величиной стока и интегрально отражающие влияние стокообразующих и косвенных факторов. Факторы, включенные в эту группу, называются условными

## 1.2 Стокообразующие факторы

Стокообразующие факторы – самая маленькая, но наиболее важная группа, которая включает осадки (жидкие и твердые) и грунтовые воды. Осаждение относится к типу климатических факторов и грунтовых вод к факторам подстилающей поверхности, учитывая их местоположение и условия формирования. Распределение стокообразующих факторов на территории подчиняется закону географического зонирования. Осаждение является основным компонентом водного цикла в природе. Длительное отсутствие осадков приводит к прекращению речного стока и высыханию водоемов. Осаждение является основным компонентом в поставках

подземных вод. Однако роль и значение осадков при формировании различных характеристик речного стока неодинаковы и варьируются от преобладающего (максимального стока) до незначительного (минимального стока), если осадки рассматриваются явно. Характер их влияния на климатические зоны также различен.

Осадки характеризуются интенсивностью, продолжительностью, частотой осаджения, распределением по территории.

Подземные воды питают реки в течение года. В период длительного отсутствия дождя кормление рек осуществляется только за счет этих вод, заключенных в водоносные горизонты, осушенные реками. Мощность и количество осушенных гор, а также потеря воды из них определяют объем воды, поступающей в речную сеть. Запасы подземных вод в бассейне реки зависят как от степени общего увлажнения территории, определяемой климатическими факторами, так и от геологического строения и гидрогеологических условий бассейна. Распределение подземных вод над территорией и глубиной речного бассейна может быть очень разнообразным и сложным. Реки получают подземные корма в основном из зоны интенсивного водообмена.

### 1.3 Косвенные факторы

Косвенные факторы непосредственно не участвуют в формировании речного стока, поскольку они не создают излишнюю часть водного баланса, но участвуют в перераспределении и изменении его величины с течением времени (по месяцам, годам и годам) и пространству (в Площадь водосбора и глубинный речной бассейн). В эту группу входят такие климатические факторы, как испарение, температура воздуха и почвы, дефицит влажности воздуха и факторы подстилающей поверхности: топография водосбора, озера, болота, лес, гидрогеологическая структура системы речного бассейна, ее геология и почвы, оледенение, Экономической активности

(антропогенный фактор). Факторы, лежащие в основе поверхности, обычно имеют локальное значение и относятся к категории азоновых. Их влияние может быть настолько значительным, что многие особенности режима речного стока, присущие этим климатическим условиям, полностью теряются, особенно для небольших рек.

Климатические факторы, входящие в группу косвенных факторов, играют преимущественно отрицательную роль в формировании речного стока. Испарение является основным отрицательным (или расходным) компонентом водного баланса речного бассейна. Это оказывает существенное влияние на режим речного стока, особенно в худший весенний период года. Естественно, что основное влияние испарения проявляется в теплое время года, когда выпадает большая масса влаги. Испарение зависит от теплового баланса подстилающей поверхности, что, в свою очередь, определяется радиационным балансом территории. Все это отражается на климатических зонах, характеризующих соотношение осадков и испарения. Испарение, как и осаджение, предопределяет перенос влаги в речной бассейн. Таким образом, большие потери, связанные с испарением в предыдущем году, могут привести к значительному сокращению потока данного года (или зимнего стока в этом году). Испарение с поверхности суши является основным расходным компонентом водного баланса речного бассейна.

Влияние температуры воздуха и почвы оказывает смешанное влияние на характеристики стока. Его увеличение приводит к уменьшению стока в летний сезон (за исключением ледниковых рек) и увеличению зимы (в оттепели). В теплое время года повышение температуры воздуха и почвы вызывает увеличение дефицита влажности воздуха и, как правило, потерю влаги до испарения, что приводит к истощению потока рек. Это наиболее ярко проявляется в маловодный период года, когда наблюдается сушка рек. И наоборот, в горных районах с ледниками в бассейне реки повышение температуры воздуха приводит к увеличению таяния льда и, как следствие,

резкому увеличению потока воды в реках. В зимний сезон очень низкие отрицательные температуры воздуха и длительный период времени, в течение которых они наблюдаются, вызывают значительное замерзание почвы и почвы и большие потери воды для образования льда, особенно зимой с небольшим количеством снега. Это характерно для территорий с резко континентальным климатом и в зоне развития вечной мерзлоты.

Из факторов, лежащих в основе поверхности большого, но местного значения факторов, которые являются аккумуляторами осадков и стока, являются озера, болота, ледники, лед. Влияние озер на речной сток и его режим может быть очень значительным, вплоть до подавления влияния других факторов. Озера накапливают в них поступающую воду и перераспределяют их во времени, т. е. являются регуляторами стока. Характер регулирования зависит от конкретных физико-географических условий (зоны увлажнения), типа озера (формы бассейна), местоположения по отношению к расчетной линии, количества озер в водосборном бассейне реки и их поток, соединение озер с грунтовыми водами. Если в водосборном бассейне имеется значительное количество дренажных озер, то последние, накапливающие поверхностные и подземные воды, расходуют входящий сток только на испарение (летом) или на льдообразование (зимой). Это приводит к уменьшению существующей водосборной площади. Поэтому, в удобной обстановке, озера могут иметь отрицательную ценность при питье рек. Озера, расположенные на притоках, оказывают меньшее влияние на речной сток, чем озера в основном русла реки, особенно вблизи поселка. Влияние малых озер на речной сток следует рассматривать в их совокупности, в то время как крупные озера следует исследовать как самостоятельные объекты. Водосбор озера характеризуется чаще всего отношением площади зеркала озера к площади всего речного бассейна (коэффициент озерности), но наилучшей характеристикой является значение среднего озера, т. е. когда размеры озера и его водосборного бассейна учитываются в отношении общей площади водосбора реки. Это значение

более полно отражает роль озера в образовании речного стока. В количественной форме влияние озер на различные характеристики стока учитывается с помощью парной или множественной корреляции с учетом положения озер относительно расчетного створа. Влияние болот на речной сток неоднозначно и определяется их типом, климатическими и гидрогеологическими условиями, в которых они существуют, а также характером поверхности болот (наличие открытой воды) и степенью заболачивания. Поверхности водосборной площади по сравнению со средней болотистой территорией. Болота, как и озера, но в меньшей степени, оказывают регулирующее воздействие на речной сток, накапливая часть осаждаемых осадков. В этом случае сток из природных болотистых массивов происходит только до тех пор, пока свободные влажные запасы не исчерпываются в активном слое болота. Когда уровни болотных вод опускаются до инертного горизонта и ниже, сток из болотистого массива практически прекращается. В этом случае осадки, падающие на дренажный бассейн, используются для пополнения запасов инертных, а затем активных болотных горизонтов, т.е. Определенная часть стока не входит в речную сеть. Испарение с их поверхности оказывает большое влияние на утечку из болот. В зоне избыточной влаги, где испарение с болот немного выше, чем испарение с суши, болото можно рассматривать как верхний водоносный горизонт, питающий реки. В зоне недостаточной влажности испарение с болот, а также с поверхности воды больше, чем с суши. Поэтому в период низких вод кормление с болот прекращается довольно быстро, а поток болотистых рек в это время равен или меньше, чем поток без заболоченных рек. В зимний сезон значительные запасы болотных вод расходуются на формирование льда, а в зоне многолетних морозов до полного замерзания, что также снижает роль болот как источников речного стока. В зоне вечной мерзлоты болота с меньшей вероятностью регулируют сток, чем в других физико-географических районах, из-за низкой годовой толщины оттаивающего торфяного слоя и небольших откосов, что способствует

сохранению осадков и их дальнейшему испарению. Поэтому здесь сток от заболоченных водосборов практически такой же, как и от необитаемых водоразделов. Для анализа влияния болот на речной сток используются уравнение водного баланса или графики дренажного потока построены с заболачиванием или используются многочисленные корреляционные и другие методы.

Ледники в горных районах накапливают твердые осадки, перенося их в жидкий сток в теплое время года. Влияние льда на речной сток зависит от размера ледников, их количества в речном бассейне, высоты ледников и географической зоны, в которой расположена горная система. Режим течения ледниковых рек в летний сезон резко отличается от неледниковых рек, и их потребление может быть во много раз больше, чем у рек, у которых нет ледников на их водосборной площади. Интенсивность таяния ледников и, следовательно, потеря воды от них зависят в основном от температуры воздуха, поэтому сток ледниковых рек является самым большим в самые жаркие месяцы. В зоне вечной мерзлоты на водосборных реках, образующихся в зимний период, образуется большое количество льда. Они накапливают грунтовые воды, вклиниваются на поверхность водосборного бассейна или в русло реки и отдают их в теплое время года.

Роль лесов в формировании речного стока – довольно обширная литература. Долгое время существовали две противоположные точки зрения, которые рассматривали лес как чисто позитивный, или как отрицательный фактор в формировании речного стока. Это противоречие объясняется прежде всего сложностью самой проблемы и различиями в подходах к ее исследованию. Часто лес рассматривался как единое целое без деления в соответствии с его видовым составом, возрастом и плотностью, т. е. Без учета постоянно меняющейся структуры лесного биогеоценоза. Как и речной сток в его зависимости от леса, был взят в целом и не рассматривался поэтапно. Слабо или полностью игнорируются другие факторы (почва и почва, глубина появления подземных вод, наклон водосбора и т. д.). Лесная

растительность в первую очередь влияет на количество осадков. Значительная часть из них задерживается коронами деревьев и не достигает поверхности земли. Например, в густых сосновых лесах сохранилось 25%, а в густых еловых до 35% твердых и жидких осадков, выпавших над лесом. В лиственных лесах этот показатель снижается до 10% (от годовых осадков). На практике все отсроченные осадки теряются до испарения. Однако видовой состав и плотность леса меняются со временем, поэтому меняется и количество осадка, которое сохраняется, т. е. происходит испарение: наименьшее – в очень молодых и старых лесных массивах, а наибольшее – в середине (возраст 35 - 70 лет). Так же меняется и транспирация кронами деревьев, поэтому суммарное испарение с лесного массива зависит от его возраста и превышает испарение с поля в молодых и средневозрастных лесах в среднем на 20 %. В очень молодых и старых лесах испарение может быть меньше, чем с поля (до 10%). Имеются данные об увеличении количества осадков над лесными районами, однако в основном в районах с чередующимися большими просторами с облесением, что характерно для лесостепной зоны. Леса сильно влияют на перераспределение твердых осадков в зимний период. Это наиболее ярко проявляется в лесостепных районах, где снегопады в лесных районах могут быть на 50-70% выше, чем в открытых полях. В лесной зоне этот избыток составляет в среднем 20-30% в смешанном и 5-10% в хвойных лесах. Такое перераспределение снега связано с ветровым режимом открытых (полевых) и закрытых (лесных) пространств и особенно заметно в водосборах небольших рек. Неравномерное распределение осадков, падающих на поверхность, определяет различные запасы влаги в водосборных бассейнах и различное количество проникающей влаги. Последнее тесно связано с природой почвенных почв, которые обычно более пористые в лесных бассейнах, чем в нелесных, из-за наличия различных видов пустот и корневых путей. Большое количество воды сохраняется в рыхлом лесном подстилке, поэтому в лесах весной или после сильных дождей это редко, и только в некоторых местах происходит

движение поверхностных вод. Основная часть стока происходит в верхних горизонтах почвы (в слое толщиной 30 – 60 см) и первом горизонте грунтовых вод. Лес способствует перераспределению речного стока к сезонам года. Он может уменьшить сток до высоководной фазы и увеличить ее до низководной фазы. Большую роль в этом играет тип почвенных почв, которые составляют: речной бассейн и другие факторы. Чем более водопроницаемые, почвенно-грунтовые, тем сильнее проникает на водосборную реку. Поэтому, например, на лесных участках, застроенных песками, поверхностный сток не превышает 10%, а основной поток реки получается из подземных вод. Таким образом, влияние леса на речной сток определяется большим количеством физических и географических факторов: общей влажности территории (климатические факторы), рельефа, почвы и почвы, гидрогеологической структуры бассейна, глубина русла реки, а также фаза водного режима реки, тип, плотность и возраст леса, а также размер площади, в которой он находится, лесные. Последние характеристики (за исключением лесонасаждений) обычно не учитываются при анализе влияния лесов на сток, но используется только коэффициент лесонасаждения, который отражает соотношение облесенных и безлесных районов в водосборной зоне.

Рельеф водосборного бассейна оказывает определенное влияние на речной сток. Особый интерес представляют следующие характеристики рельефа: высота водосборного бассейна, изменение ландшафта в водосборном бассейне, расчленение территории, географическая экспозиция (отношение к странам мира) склонов Водоразделов, а в горных районах также экспозиции относительно ветров влаги. Элементы рельефа влияют на распределение трех основных климатических факторов над территорией: количество осадков, испарение и температура воздуха. Это, в свою очередь, вызывает изменение территории и во время поверхностного и подземного стока, образующих речной сток. Сразу же элементы рельефа влияют на условия образования стока, изменяя интенсивность процессов потока воды

вдоль поверхности водосборной площади и время, когда вода достигает вдоль склонов и канала. Они также влияют на процессы накопления снега и таяния снега, скорость инфильтрации жидких осадков и их накопление. Рельеф водосбора реки в качестве физико-географического фактора следует учитывать в случае его значительных изменений, например, при наличии возвышенностей на обычно плоской территории, от низинных мест до гор и гор. На обширных равнинах изменение относительных высот местности на 100 – 200м приводит к увеличению общего содержания влаги на территории и, как следствие, к увеличению потока рек.

Влияние различных элементов рельефа на характеристики течения учитывается в качественных и количественных формах. Количественными характеристиками рельефа являются высота зоны водосбора, наклон склонов водосбора и русла реки, плотность речной сети.

Влияние геологических и почвенных условий в речных бассейнах в первую очередь отражается в процессах инфильтрации (утечки), а также поверхностного и подземного стока в почвенный покров, оказывает большое влияние на процессы переноса осажденных осадков в грунтовые воды. Таким образом, почво-грунты являются подземными аккумуляторами влаги. Они задерживают воду в периоды повышенной водности и затем отдают ее в период маловодья.

Тип почв, их механический состав, во многом определяют водопоглощающую способность водосборной площади. Чем выше пористость почв, тем больше их водопроницаемость и выход воды, но меньше удержание воды. Поэтому речной дренаж рек, чьи бассейны состоят из песчаных или супесчаных почв, заметно отличаются от речных стоков в подобных бассейнах, состоящих из суглинка или глины. Лесные почвы имеют большую водопроницаемость и водоотдачу, чем бедные леса, благодаря их большой пористости и пористости. Поглощающая способность пород, образующих бассейн, определяет инфильтрацию атмосферных осадков. Естественно, чем крупнее, тем больше просачивается под землю

осадков, тем больше будет пополнение подземных вод, питающих реки. Однако главное значение инфильтрации заключается в теплое время года. Наиболее благоприятные условия для накопления подземных вод и снабжения рек находятся в бассейнах, состоящих из рыхлых и пористых или трещинных пород (песчаников, известняков). Когда эти породы заменяются более сцементированными или кристаллическими слаботоразрушенными породами, наблюдается резкое снижение подземного стока рек. Но не один механический состав пород определяет подземный сток, большое значение имеет степень полива этих пород. Реки, бассейны которых состоят из песков, могут иметь гораздо меньший сток, чем реки, которые протекают в плотных, но пористых породах (известняках). Плотные глинистые или монолитные кристаллические породы, расположенные вблизи поверхности, уменьшают регулируемую способность бассейна, что приводит к уменьшению подземного стока к рекам и увеличению доли поверхностного стока в водосборной зоне. Поэтому в таких случаях гидрограф стока будет иметь более резкие колебания, чем при хорошей накапливающей способности бассейна. Уменьшение разрыва кристаллических пород приводит к уменьшению их обводненности и уменьшению подземного стока. Их влияние на сток (особенно в мелкий период года) может быть определяющим по сравнению с влиянием любых других факторов и может быть представлено как положительно, так и отрицательно. Основное влияние карстовых пород находится на утечке малых рек. Чем больше водопоглощающая способность карстовых пород и чем медленнее их водоотдача, тем значительнее их влияние. В районах интенсивного развития карста речная сеть вообще может отсутствовать, но образующиеся там подземные воды обычно принимают активное участие в формировании речного стока и даже не одной, а нескольких речных систем. Влияние карстовых пород на речной сток уменьшается по мере увеличения размера бассейна, так как уменьшается удельный вес участков с интенсивным развитием карста. Согласно влиянию карстовых пород на речной сток, можно

выделить области: с резким влиянием карста, что характерно для относительно небольших площадей (до 500 км<sup>2</sup>); При заметном влиянии карста на сток малых рек (в основном на экстремальные характеристики стока); При слабом влиянии карста, который проявляется только для очень малых речных бассейнов, особенно в худшие весенние годы. В зависимости от географического района, типа характеристик карста и стока, влияние карста может быть прослежено для рек с площадью бассейна до 2000-3000 и даже до 10 000 км<sup>2</sup>. Геологические и почвенные условия речных бассейнов наиболее непосредственно учитываются при распределении площадей с аналогичными условиями для образования стока, особенно минимального стока рек. В то же время в комплексе оцениваются как гидрологические, так и геологические условия и подземный сток к рекам. Количественными характеристиками подземного стока могут быть скорости потока пружин и колодцев из водоносных горизонтов, участвующих в кормлении рек. Геологические и гидрогеологические условия бассейнов определяются соответствующими картами. Количественная оценка распределения определенного типа почвы определяется крупномасштабными картами почв (сельскохозяйственных земель) в качестве соответствующей доли общей площади. Влияние экономической активности на речной поток (антропогенное воздействие) и, в целом, на водные ресурсы конкретных территорий постоянно растет. Он осуществляется по следующим основным направлениям: потребление воды для промышленных и бытовых нужд, строительство водохранилищ и прудов, орошение сельскохозяйственных полей, дренаж болот и болот, перераспределение стока между речными бассейнами, меры агролесоводства в водосборных бассейнах реки. Влияние каждого из этих видов человеческой деятельности оказывает различное влияние на характеристики стока. Характер и степень влияния антропогенных факторов на речной сток зависят от их расположения в руслах рек (водохранилищах, водоемах, крупных водозаборах и сбросах). Степень этого влияния на различные характеристики стока находится в

зависимости от регулирующей способности водохранилища (месячное, сезонное, многолетнее), что определяется его рабочим объемом. Водохранилища задерживают сток и увеличивают испарение, особенно в зоне недостаточного увлажнения. Из них забирается вода на орошение и водоснабжение. Часть стока расходуется на заполнение ложа водохранилищ. Она тем больше, чем крупнее водохранилище.

Агролесотехнические мероприятия включают большой комплекс различного рода работ на водосборах рек: распашка целинных и залежных земель, глубокая осенняя (зяблевая) пахота для сохранения влаги в почве, снегозадержание, посадка лесополос (лесотехнические мероприятия). Эти меры помогают повысить пористость и проницаемость почв и усилить фильтрацию талых вод. Они также изменяют распределение снега в зоне водосбора (снос его на овраги, балки, русла рек). Это приводит к уменьшению стока склонов, которое в маловодные годы может быть сведено к нулю. Таким образом, основной целью агролесомелиоративных мероприятий является снижение доли поверхностного стока от водосборного бассейна и увеличение запасов влаги в толщине почвы. Это, конечно же, улучшает поставки подземных вод, особенно верхних водоносных горизонтов. Тем не менее, потери транспирации возрастают, и чем больше они происходят, тем важнее воздействие агролесотехнических мер на речной сток.

Множество факторов (характер почв, степень и тип их переработки, их гидратация и способность к проникновению) и различная степень их влияния затрудняют количественную оценку. Этому также способствует отсутствие общих общепринятых методов оценки влияния различных компонентов агротехнических мероприятий на характеристики запасов.

Посадка лесных поясов способствует сохранению снега на полях и пополнению грунтовых вод, что положительно влияет на общие запасы влаги и задерживает сокращение стока. Оценка влияния комплекса экономических

факторов на речной сток может быть проведена с использованием регрессионной модели.

### 1.3.1 Влияние урбанизации территорий

Влияние урбанизации территорий на речной поток носит локальный характер, поскольку оно ограничено только застроенными городскими районами. Но его важность возрастает с развитием городов, особенно с большим расширением их пространства. В городах коэффициент стока увеличивается из-за наличия больших площадей с водонепроницаемым покрытием (асфальтированные улицы и площади, крыши домов). По городам наблюдается увеличение количества осадков из-за наличия дополнительных ядер конденсации (запыленность и дымовая завеса воздуха). В то же время наблюдается повышение температуры воздуха, особенно в крупных городах, что сказывается на процессах испарения и таяния снега. Городское водоснабжение может осуществляться за счет вод, взятых из соседних речных систем, или из подземных водоносных горизонтов, не осушенных этой рекой. Поэтому сброс таких вод приводит к увеличению стока рек. Однако забор воды для нужд города выше, его черты и последующий сброс уменьшают речной сток на размер потерь воды во время ее потребления. Уже такая неполная схема формирования стока в городской местности показывает сложность ее расчета и оценки воздействия урбанизации на речной сток. Можно отметить, что большая часть водосборной площади реки занята урбанизированной территорией, тем сильнее естественный поток реки может быть искажен. Такое же локальное воздействие на речной сток оказывает более высокая добыча полезных ископаемых и разработка карьеров. В результате перекачки воды происходит резкое падение уровня грунтовых вод вплоть до их отделения от русла реки. В результате река в зоне образовавшейся депрессионной воронки попадает в подвешенное состояние и, вместо того чтобы получать подземное питание, сама начинает отдавать

свои воды. В этом случае поверхностный сток значительно уменьшается в зоне действия воронки, или поверхностный сток полностью прекращается. Однако в местах сброса рудников и карьеров речной сток может значительно увеличиться. Правда, качество воды может резко ухудшаться. Перераспределение (перенос) потока оказывает большое влияние на сток данной территории.

Стокообразные и косвенные факторы дают представление о физической роли основных физико-географических факторов в формировании речного стока. Оценка их количественного влияния может быть проведена посредством конкретного или комплексного анализа влияния одной или группы факторов с использованием методов регрессионного анализа, предназначенных для определения многофакторных отношений. К сожалению, не все факторы могут быть выражены в количественной форме или достаточно надежно, чтобы определить их значение. Однако можно найти факторы, неотъемлемо отражающие влияние комплекса физико-географических факторов. С помощью соответствующих методов обобщения эти интегральные характеристики могут быть основными параметрами в расчетах для определения различных характеристик стока. Такие факторы объединяются в группу условных факторов. Условными факторами, используемыми при анализе образования стока и разработкой методов его расчета, являются: площадь бассейна, средняя высота водосборной площади, склон и речной склон, глубина эрозионного канала, плотность речной сети, ширина Водосбора и его периметральной длины, а также формного фактора водосбора. Поставка реки с поверхностными водами, при прочих равных условиях, зависит от размера зоны приема пласта. Чем больше это, тем больше поток вытекает из него в русло реки. Одновременно с водой будет течь больше воды. Следовательно, размер водосборной площади в некоторой степени влияет на условия подачи подземных вод, особенно на верхние водоносные горизонты почвенно-почвенной последовательности. Развитие бассейна недр по площади напрямую связано с увеличением поверхностного

водораздела. Границы поверхностных и подземных водоразделов в большинстве случаев совпадают. Исключение составляют карстовые районы, районы с присутствием артезианской воды и другие аномальные явления. Подземное питание реки зависит от глубины эрозии каналов в водоносных горизонтах, которые ее питают. Он глубже, чем длиннее река и, тем больше склоны места. Но чем длиннее длина реки, тем больше площадь ее водораздела. Питание реки также увеличивается с увеличением числа притоков, т. е. с развитием сети рек (плотность сети), что, в свою очередь, приводит к увеличению площади бассейна. Таким образом, все основные морфологические характеристики водосборных бассейнов реки взаимосвязаны и могут быть закрыты до водосбора. Расход воды увеличивается с увеличением площади водосбора, но интенсивность этого увеличения зависит от физических и географических условий образования стока. Только в пустынных регионах такая закономерность может быть нарушена, если река течет в песках. В горных районах разница в содержании влаги в водосборных бассейнах, то есть в содержании воды в реках, может быть отражена средней высотой водосборных бассейнов в дополнение к водосборной площади. По мере увеличения высоты водосбора количество выпадающих осадков быстро возрастает. Одновременно увеличиваются и уклоны местности, что способствует быстрому стеканию выпавших осадков и уменьшению инфильтрации. Но на больших высотах (2500-3000 м и более) осадки чаще выпадают, как снег, и накапливаются в ледниках и снежных полях, снижая сток зимой и увеличиваясь летом. И на очень больших высотах или в гористых странах количество осадков обычно может быть уменьшено. Таким образом, высота водосбора в большинстве случаев выступает в качестве положительного фактора, но при определенных условиях она может быть отрицательной. Его количественное выражение обычно представляет собой среднюю высоту зоны водосбора, но с резким изменением локальных высот более целесообразно использовать средневзвешенную высоту. Высота зоны водосбора в качестве расчетного параметра отражает влияние только

климатических факторов (осадков, испарения), поэтому его роль в наиболее яркой форме проявляется в районах с интенсивным развитием горных процессов в прошлом (Кавказ, Памир, Тянь-Шань, Алтай, П.). На возвышенных участках с сглаженными и облесенными формами рельефа значение высоты уменьшается, хотя в целом его роль как индекса увлажнения сохраняется. Но в таких районах не меньшее, а часто, и большее значение приобретает площадь бассейна реки как более общий показатель условий формирования стока рек.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Термин «модель» широко используется в различных сферах человеческой деятельности и имеет множество смысловых значений. Рассмотрим только такие модели, которые являются инструментами для получения знаний.

Модель представляет собой материальный или ментальный объект, который в процессе исследования заменяет исходный объект таким образом, что его прямое исследование дает новые знания об исходном объекте

Под моделированием понимается процесс построения, изучения и применения моделей. Он тесно связан с такими категориями, как абстракция, аналогия, гипотеза и т. д. Процесс моделирования обязательно включает в себя построение абстракций, выводов по аналогии и построение научных гипотез.

Главная особенность моделирования заключается в том, что это метод опосредованного познания с помощью заменяющих объектов. Модель действует как своего рода когнитивный инструмент, который исследователь ставит между собой и объектом и с помощью которого изучает объект, представляющий интерес. Именно эта особенность метода моделирования

определяет конкретные формы использования абстракций, аналогов, гипотез, других категорий и методов познания.

Необходимость использования метода моделирования определяется тем фактом, что многие объекты (или проблемы, связанные с этими объектами) не могут быть непосредственно исследованы или полностью невозможны, или для этого исследования требуется много времени и денег.

Процесс моделирования включает в себя три элемента:

- 1) субъект (исследователь);
- 2) объект исследования;
- 3) модель, опосредующая связь познающего субъекта и познаваемого объекта.

## 2.1 Определение физического моделирование

Физическая модель – это модель, созданная путем замены объектов на устройства моделирования, которые имитируют определенные характеристики или свойства этих объектов. В этом случае симулятор имеет такой же качественный характер, как и моделируемый объект.

Физические модели используют масштабный эффект в случае возможности пропорционального применения всего комплекса изученных свойств.

Физическая модель является аналоговой моделью, в которой существует взаимно однозначное соответствие между параметрами объекта и моделью той же физической природы. В этом случае физические элементы, соответствующие элементам системы, сопоставляются, воспроизводя структуру, основные свойства и отношения исследуемого объекта. В физическом моделировании, основанном на теории подобия, особенности проведения эксперимента в натуральном выражении сохраняются с

соблюдением оптимального диапазона изменения соответствующих физических параметров.

Физическое моделирование – метод экспериментального изучения различных физических явлений, основанных на их физическом сходстве.

Метод состоит в создании лабораторной физической модели явления при уменьшенных масштабах и проведении экспериментов по этой модели. Выводы и данные, полученные в этих экспериментах, затем распространяются на явление в реальных масштабах.

Метод применяется при следующих условиях:

- описание физического процесса слишком громоздко и требует большого количества исходных данных для расчетов, получение которых затруднено.
- воспроизведение физического явления, изучаемого с целью эксперимента в реальных масштабах, невозможно, нежелательно или слишком дорого.

Метод может давать достоверные результаты только в том случае, если наблюдается физическое сходство реального явления и модели. Сходство достигается за счет равенства модели и реального явления значений критериев подобия – безразмерных чисел, в зависимости от физических (в том числе геометрических) параметров, характеризующих явление. Экспериментальные данные, полученные методом физического моделирования, распространяются на реальное явление с учетом критериев подобия.

В широком смысле любой лабораторный физический эксперимент является симуляцией, поскольку в эксперименте в конкретных условиях наблюдается конкретный случай явления, но требуется получить общие закономерности для всего класса подобных явлений в широком диапазоне условий. Искусство экспериментатора заключается в достижении физического сходства между наблюдаемым в лаборатории явлением и изученным классом изучаемых явлений.

## 2.2 Основные принципы физического моделирования

Задача физического моделирования заключается в определении характеристик основной структуры в соответствии с характеристиками модели, обнаруженной во время ее тестирования. Особенностью физического моделирования является то, что для определения характеристик основной структуры не требуется математическое описание процессов, необходимо только иметь представление о механизме (физической природе) явлений, чтобы правильно рассчитать параметры основной структуры из модельной модели структуры.

Поскольку в физическом моделировании физическая природа явлений, происходящих в реальном продукте и модели, одинакова, то из результатов экспериментов на моделях можно оценить природу эффектов и количественные соотношения между величинами для реальных условий.

Основой физического моделирования является теория подобия. Конкретные типы физического сходства:

- геометрические (сходство аналогичных геометрических элементов или тел);
- кинематика (сходство полей скоростей для двух рассмотренных движений);
- динамическое (сходство систем действующих сил или силовых полей различной физической природы – гравитация, сила давления и т.д.);
- механический (при условии наличия геометрического, кинематического и динамического подобия);
- сходство термических процессов;
- электродинамические.

В механическом моделировании различаются простые и расширенные сходства, которые могут быть приближительными. Общими условиями

простого и расширенного сходства являются следующие: модель и природа должны быть геометрически подобными; Силы, действующие на модель нагрузки, должны быть подобны напряжениям, действующим на природу; Безразмерные величины (коэффициент Пуассона, коэффициент трения, относительная деформация и т. Д.) Должны быть одинаковыми для модели и характера; Материал модели и природы может быть разным, но в исследуемой области связи напряжение и напряжение должны следовать закону Гука.

Разница между простым и расширенным сходством заключается в том, что для простых коэффициентов подобия для напряжений модули упругости одинаковы, а для расширенного они различны, а в последнем случае упругие константы модельных и природных материалов могут также быть разными. Желательно, чтобы коэффициенты Пуассона были одинаковыми.

Физическое моделирование состоит из двух этапов:

1. Теоретическое воспроизведение модели изучаемого физического явления или технического устройства (включая структуры и структуры) аналогичного полномасштабного образца.

2. Создание моделей и выполнение необходимых наблюдений и измерений на них.

Теория моделирования основана на теории подобия. Пересчет данных, полученных по модели, в основную структуру осуществляется на основе теории подобия.

## 2.3 Применение физического моделирования в гидрологии

Лабораторные исследования и гидравлическое моделирование жестких и деформируемых моделей рек и пойм широко и давно используются в гидрологии при проектировании, строительстве и эксплуатации различных и многочисленных речных инженерных работ, планировании и реализации мер, направленных на защиту от наводнений, для обеспечения судоходства

рек, по регулированию русел рек, организации и мониторинге рационального использования, охраны и реставрации речных систем, русла рек и пойм, а также при разработке методов управления гидрологическими процессами. Конечной целью экспериментальных методов и моделирования является оптимизация материальных и финансовых затрат в гидротехнической практике и обеспечение надежности и безопасности принятых инженерных и экономических решений, не наносящих экологического ущерба окружающей среде.

Почему же всё-таки физическое моделирование?

Сложный характер формирования склонового стока в руслах рек с различными типами руслового процесса с морфологическим строением русла, присущего каждому типу, изменение величины стока в зависимости от конкретного вклада в конкретные речные и русловые формы в разных фазах водного режима (паводок, межень) показывают, что математическая модель на данном этапе своего развития не может описать эти процессы.

В математических моделях традиционные понятия и методы определения склонового стока используются на основе коэффициента шероховатости  $n$  (предполагается постоянным) и анализа кривых  $Q = f(H)$ , которые, как известно, отличаются своей двусмысленностью и наличием петель гистерезиса для различного наполнения русла и поймы. Эта неоднозначность и закономерности изменения величины стока с заполнением русла никоим образом не могут быть правильно описаны математической моделью с ее чрезвычайно упрощенными представлениями о процессе формирования стока. Физическая модель, отражающая реальную морфологию русла (и поймы) с его реальными морфологическими фрагментами. Неадекватность метода математического моделирования описанному явлению явно проявляется также при попытке использовать этот метод в гидравлических проблемах, связанных с наличием пойм (затопление пойм, пропуская наводнения и наводнения, развитие пойм, отчуждение их

частей, сброс пойменных пойм, оценка возможных последствий антропогенных аварий гидротехнических сооружений и т.д.).



Рисунок 2.1 – Русловая лаборатория ГГИ.  
Общий вид экспериментального зала

### 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И АЛГОРИТМ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 3.1 Описание экспериментальной установки

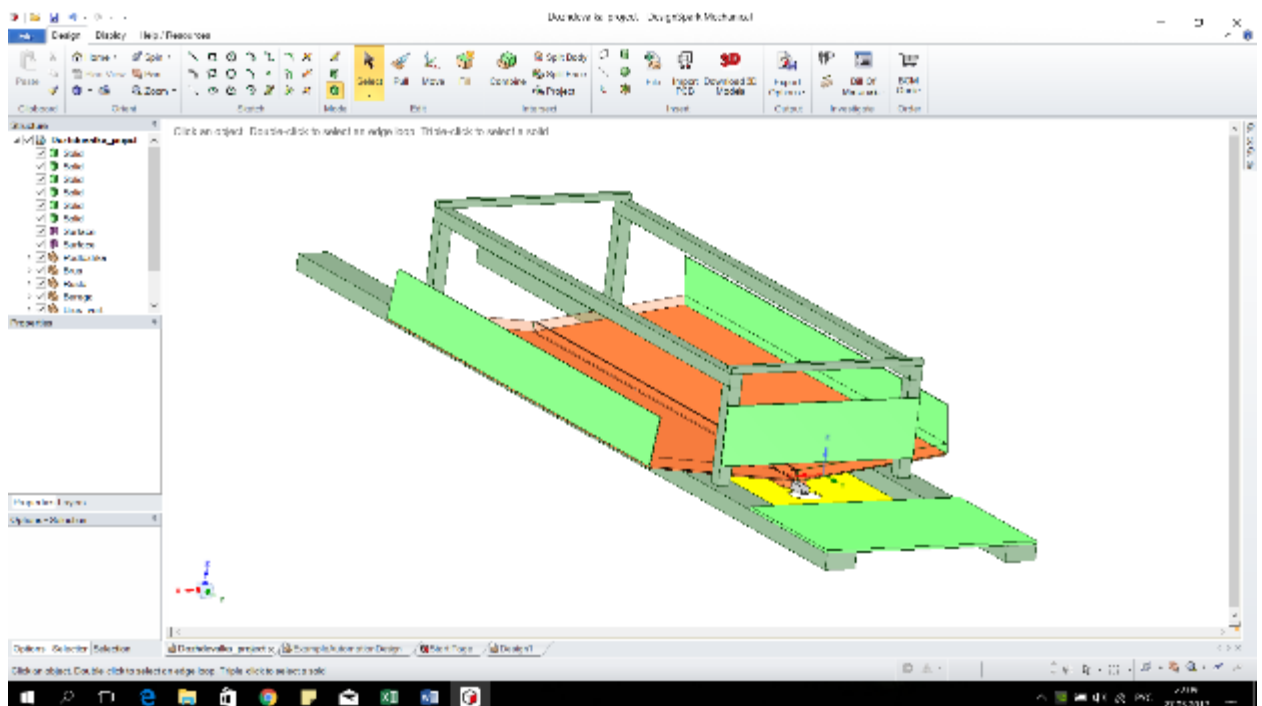
##### 3.1.1 Создание 3Dмодели

Конструкция проектируемой установки должна была обладать следующими качествами:

- жесткость;

- модульность (возможность замены отдельных частей для доработки, ремонта и транспортировки);
- небольшой вес;
- оптимальные размеры для расположения её в учебной лаборатории водных исследований.

Первым шагом в создании будущей установки стало проектирование 3Dмодели. Разработка проекта осуществлялась в программе DesignSparkMechanical 2.0. Было решено, что необходимо использовать в качестве основания несущую раму из бруса размером **xxx** на **xxx** в середине которой располагалось бы плоское основание, на котором было установлено предполагаемое русло. Так же на этом основании необходимо было решено установить распределительный коллектор с помощью которого осуществлялось управление загрузенностью форсунок и шпильки для регулировки углов наклона берегов. Верхняя часть состоит из прямоугольного каркаса, на котором были проложены трубки с подключенными к ним форсунками.



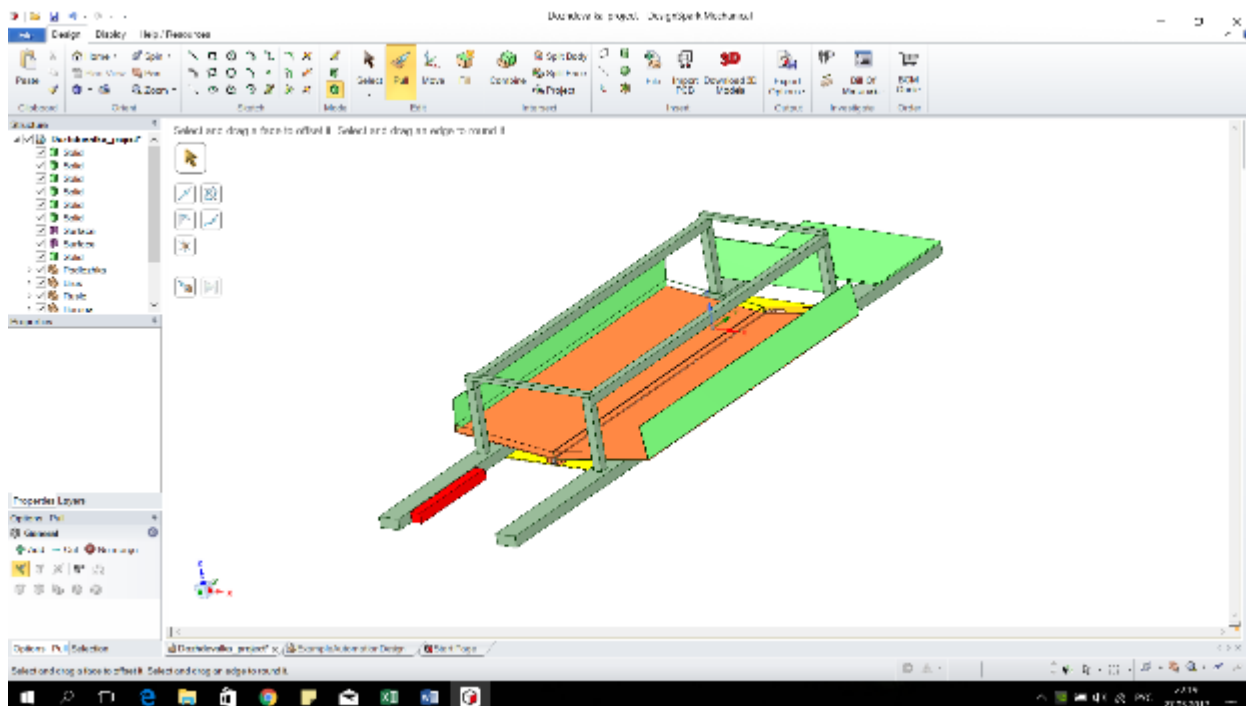


Рисунок 3.1 – 3Dмодель в программе DesignSparkMechanical 2.0

### 3.1.2. Монтаж экспериментальной установки

После создания 3Dмодели экспериментальной установки, приступили к её непосредственному монтажу. Процесс монтажа представлен на рисунках 3.2 – 3.6.



Рисунок 3.2 – Процесс сборки основания установки



Рисунок 3.3 – Изготовление распределительного коллектора



Рисунок 3.4 – Сборка каркаса и установка коллектора с расходомером



Рисунок 3.5 – Установка форсунок и берегов на регулируемые шпильки



Рисунок 3.6 – Конечный вариант после установки всех необходимых комплектующих

### 3.1.3 Датчик расхода воды

Датчик расхода воды состоит из пластикового корпуса, крыльчатки и датчика холла. Когда вода течет через крыльчатку, ее лопасти вращаются. Эта скорость вращения изменяется в зависимости от скорости потока. Датчик холла выдает соответствующий импульсный сигнал. Датчики прочно сконструированы и обеспечивают цифровой импульс каждый раз, когда некоторое количество воды проходит через них. Выход может быть легко подключен к микроконтроллеру для определения количества воды.

Датчик расхода воды имеет рабочее напряжение от 5 до 24 В, максимальный ток 15 мА, вес 43 г, диапазон измерения от 1 до 30 л/мин, рабочая температура от 0° до 80° С, температура жидкости <120°, рабочая влажность от 35% до 90%, температура хранения от -20° до +80° С, точность  $\pm 10\%$ .



Рисунок 3.7 – Датчик расхода воды

Для подключения датчика к ArduinoNano требуется резистор на 1 кОм и усилитель. Расходомер имеет 3 провода, каждый из которых подсоединяется к определенному выходу на плате Arduino: черный провод подключается к контакту земля GND, красный к контакту питания +5V, желтый к контакту цифрового выхода. Схема подключения представлена ниже.

После подключения всех датчиков, необходимо загрузить рабочую программу – скетч в микроконтроллер на плате ArduinoNano. В мониторе порта, по мере прохождения жидкости через расходомер, отображаются значения в л/мин.

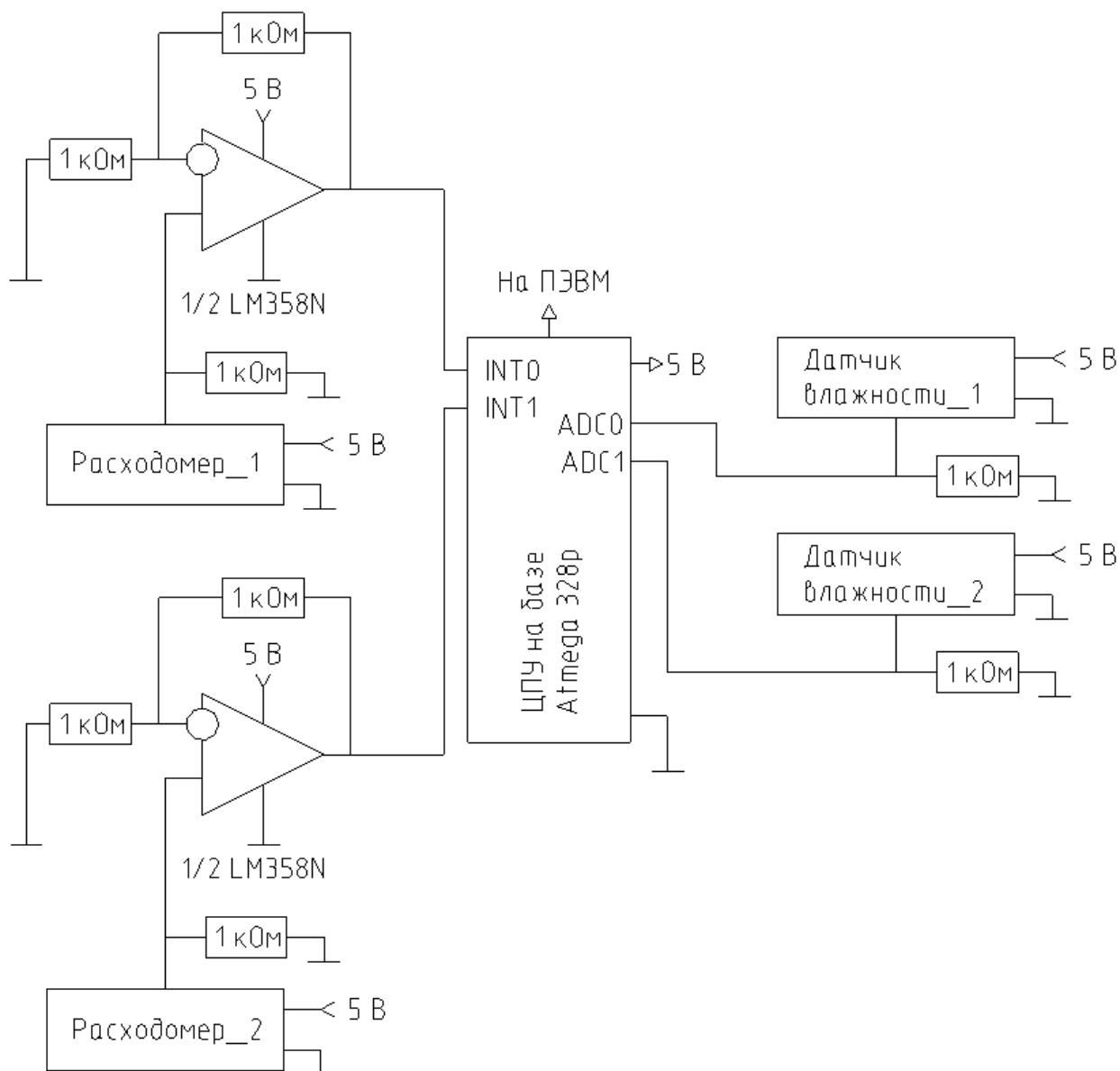


Рисунок 3.8 – Общая схема подключения датчиков

### 3.2 Программно – аппаратный комплекс

Для создания программного – аппаратного комплекса была выбрана среда разработки Arduino. Arduino – это электронная платформа с простым в использовании аппаратным и программным обеспечением. Благодаря этому она может широко использоваться в различного рода и сложности проектах.

Существует множество других схожих по характеристикам микроконтроллеров, но выбором послужила плата Arduino, которая:

- низкая стоимость;
- кроссплатформенная (ОС Windows, Linux и Macintosh);
- простая и доступная среда программирования;
- открытое для расширения и изменения программное обеспечение;
- открытое для расширения и изменения оборудование.

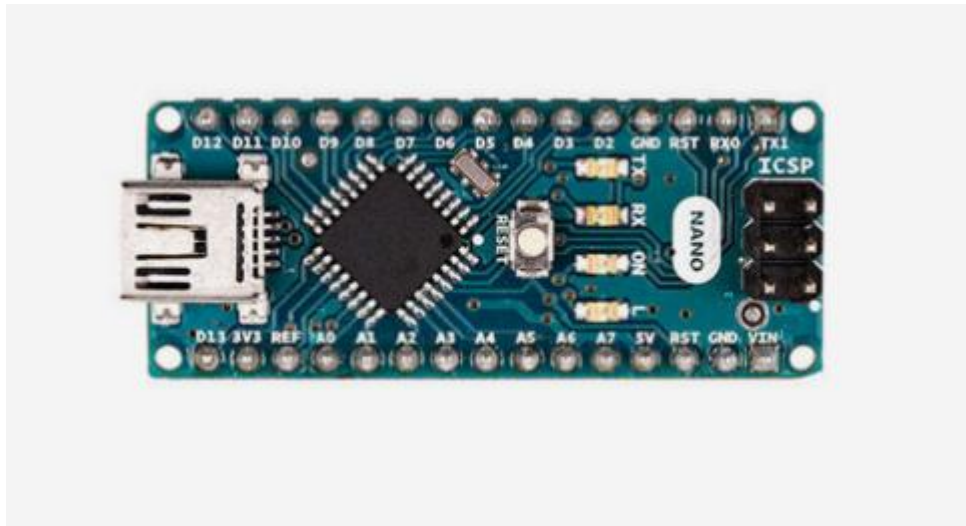


Рисунок 3.9 – Плата ArduinoNano

ArduinoNanoэто небольшая по размерам плата на основе микроконтроллера ATmega328. Эта плата схожа с платой ArduinoDuemilanove, но не имеет разъем питания постоянного тока и работает с USB кабелем типа Micro.

Плата ArduinoNano имеет рабочее напряжение 5 В, flash-память 32 КБ (2К из которой используется для загрузчика), 8 аналоговых выходов, 14 цифровых выхода, постоянные ток на вход/выход 40 мА, потребляемая мощность 19 мА, вес 7 г.

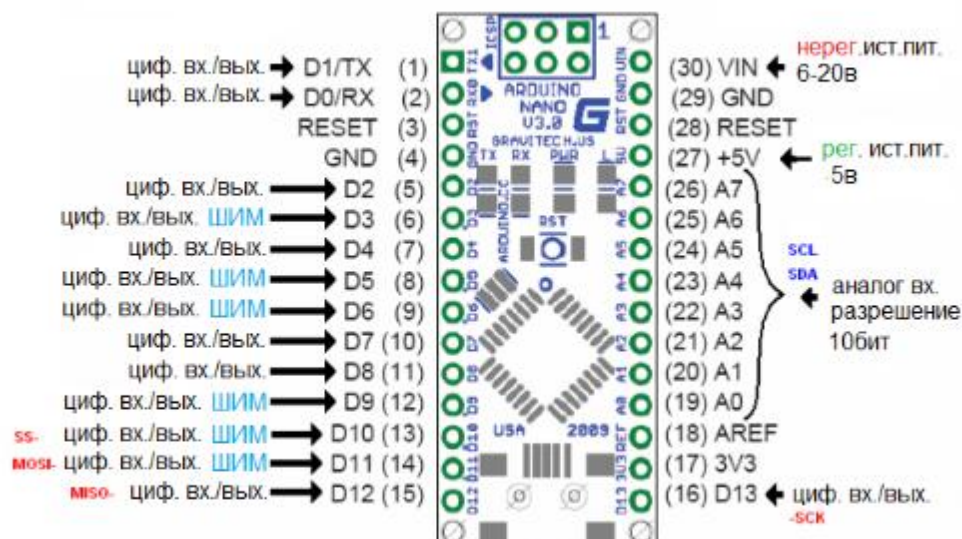


Рисунок 3.10 – Распиновка Arduino Nano

Каждый из 14 цифровых контактов на плате Nano может использоваться как вход или выход, используя функции `pinMode()`, `digitalWrite()` и `digitalRead()`. Все они работают с напряжением в 5 В. Каждый пин может обеспечивать или принимать максимум 40 мА, имеет внутренний нагрузочный резистор (по умолчанию отключен) на 20-50 кОм и обеспечивает 10 бит разрешения (то есть 1024 различных значения). Кроме того, некоторые контакты имеют специализированные функции. Например, пины 0 (RX) и 1 (TX) используются для приема (RX) и передачи (TX) последовательных данных TTL. Эти контакты подключены к соответствующим контактам последовательного чипа FTDI USB-to-TTL. Пины A4 (SDA) и A5 (SCL) имеют поддержку I2C (TWI) вместе с использованием библиотеки `Wire`.

Arduino Nano способна связываться с компьютерами, другими Arduino или другими микроконтроллерами различными способами. Микроконтроллер ATmega328 обеспечивает UART TTL (5 В) последовательную связь, которая доступна на цифровых контактах 0 (RX) и 1 (TX). Чип FTDI FT232RL на плате этой последовательной связи через USB и

драйверами FTDI (входящим в состав программного обеспечения Arduino) обеспечивает виртуальный COM-порт для программного обеспечения на компьютере. Программное обеспечение Arduino включает последовательный монитор, который позволяет отправлять простые текстовые данные на плату Arduino и обратно. Светодиоды RX и TX на плате будут мигать, когда данные передаются через чип FTDI и USB-соединение с компьютером (но не для последовательной связи на выходах 0 и 1). Библиотека SoftwareSerial позволяет осуществлять последовательную передачу данных по любому цифровому пину Arduino Nano. Также, микроконтроллер ATmega328 поддерживает связь I2C (TWI) и SPI. Программное обеспечение Arduino включает библиотеку Wire для упрощения использования шины I2C. Чтобы использовать SPI-связь, см. Техническое описание ATmega328.

### 3.2.1 Программное обеспечение ArduinoIDE

Программное обеспечение ArduinoIDE позволяет легко и просто писать рабочую программу – скетч и загружать ее в микроконтроллер. Это программное обеспечение также является кроссплатформенным и может использоваться с любой платой Arduino.

Рабочая программа – скетч имеет свой собственный язык программирования схожий с языками C++ и C#. Компилируемый язык позволяет перед загрузкой в плату Arduino обнаружить ошибки и недочеты в программном коде. После устранения неполадок, скетч загружается в микроконтроллер. Монитор порта (значок лупы в верхнем правом углу) позволяет увидеть результаты работы. К программному коду возможно добавить различного рода библиотеки, которые расширяют его функционал.

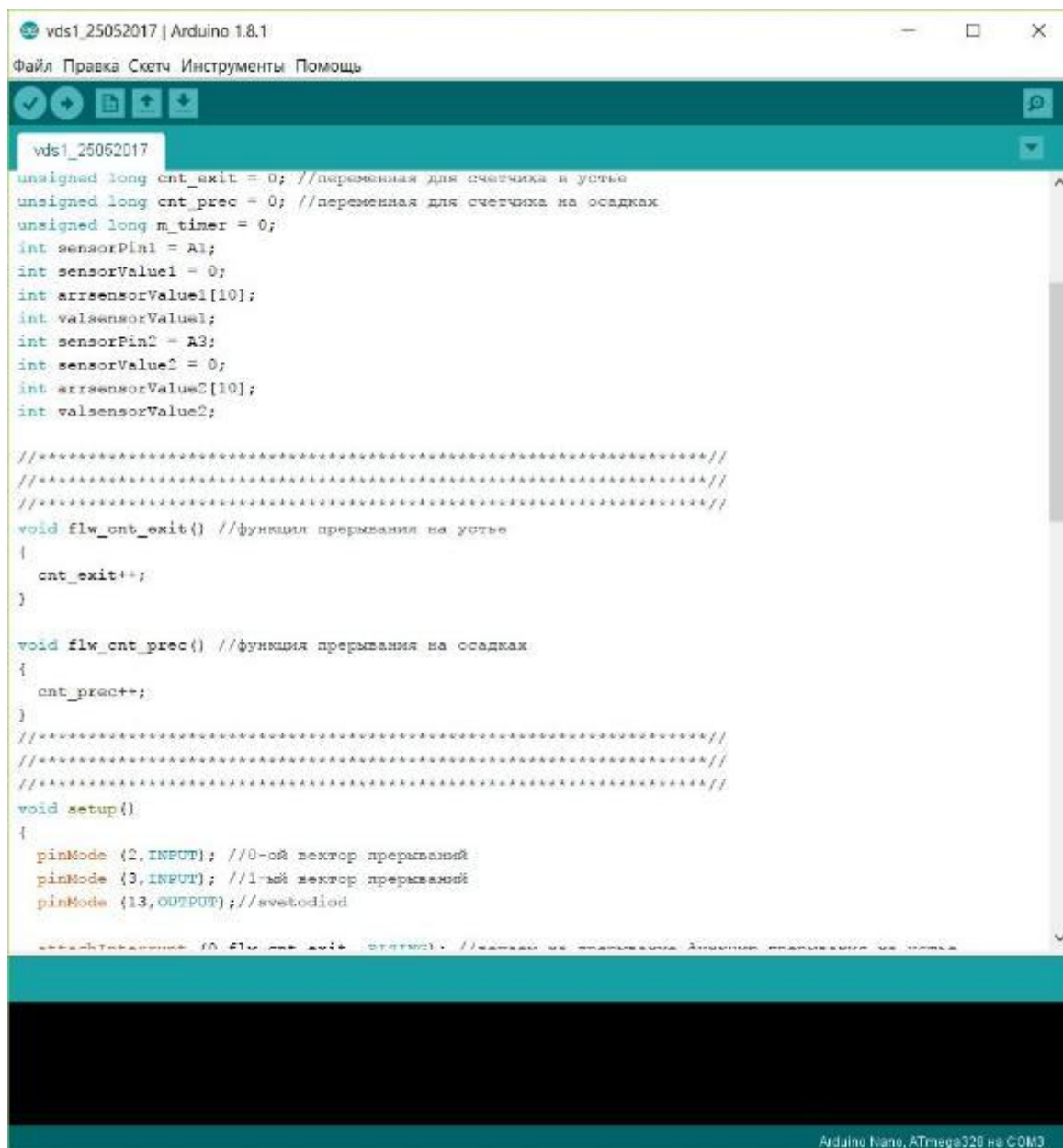


Рисунок 3.11 – Скриншот программного обеспечения ArduinoIDE

### 3.2.2 Микроконтроллер Atmel ATmega328

Atmel ATmega328 это однокриповый 28-ми контактный 8-ми битный микроконтроллер с flash-памятью 32 КБ. Рассматривая скорость работы микроконтроллера, используя 1 такт на каждую команду, возможно получить до 20MIPS (мега команд в секунду) с тактовой частотой 20 МГц. Это в 4 раза превышает скорость некоторых других микроконтроллеров, которые также могут работать на частоте 20 МГц, но требуют 4 такта на каждую команду,

что делает максимальный MIPS только 5 МГц, но это по-прежнему является неплохим результатом для большинства простых приложений.

ATmeg328a имеет несколько интерфейсных режимов, которые имеют множество возможностей для связи с другими периферийными устройствами или микроконтроллерами. Он имеет встроенные интерполяции USART, I2C и 2х SPI. USART можно использовать для связи с другими микроконтроллерами или даже с ПК, а интерфейсы SPI и I2C можно использовать для связи с другими устройствами, такими как датчики и ЖК-дисплеи.

ATmega328 имеет рабочий диапазон напряжений от 1,8 до 5,5 В, который позволяет микроконтроллеру питаться от одной кнопки 3 В, если проект требует компактности. В общем случае само устройство использует 0,2 мА, но это значение может быть уменьшено до 0,75 мкА за счет уменьшения тактовой частоты до 32 кГц для тех проектов, в которых требуется ограниченная емкость аккумулятора.

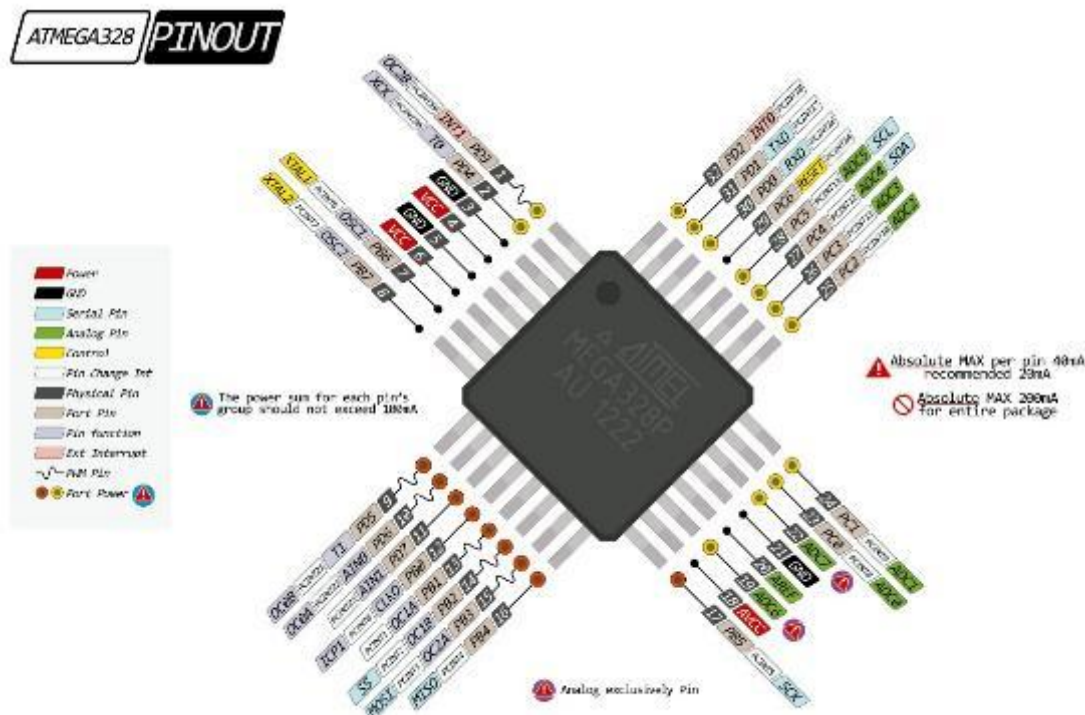


Рисунок 3.10 – Микроконтроллер Atmel ATmega328

### 3.3 Алгоритм проведения экспериментов

Важным шагом в подготовке к проведению экспериментальных измерений является правильно организованное и упорядоченное планирование хода эксперимента (алгоритм проведения опытов). Планирование экспериментов позволяют свести к минимуму количество необходимых тестов, установить рациональную процедуру и условия проведения исследования в зависимости от их типа и требуемой точности результатов. Если по какой-либо причине количество тестов уже ограничено, методы дают оценку точности, с которой результаты будут получены в этом случае. Методы учитывают случайный характер рассеяния свойств испытуемых объектов и характеристик используемого оборудования. Они основаны на методах теории вероятностей и математической статистики.

Планирование выполняемых нами экспериментов включало в себя несколько этапов:

1. Установление цели эксперимента (определение характеристик, свойств и т. д.) и его тип (определяющий, контрольный, сравнительный, исследовательский).

2. Определение оптимальных условий проведения эксперимента (доступное или доступное оборудование, условия работы, финансовые ресурсы, количество и штатное расписание сотрудников и т. Д.). Выбор типа испытаний (нормальный, ускоренный, сокращенный в лаборатории, полигоне, поле или в рабочем состоянии).

3. Идентификация и выбор входных и выходных параметров на основе сбора и анализа предварительной (априорной) информации. Входные параметры (факторы) могут быть детерминированными, то есть зарегистрированными и контролируемыми (в зависимости от наблюдателя), и случайными, то есть зарегистрированными, но неконтролируемыми. Наряду с ними на состояние исследуемого объекта могут влиять незарегистрированные и неконтролируемые параметры, которые вводят систематическую или случайную ошибку в результатах измерения. Это ошибки измерительного оборудования, изменение свойств исследуемого объекта в ходе эксперимента, например, из-за старения материала или его износа, воздействия персонала и т. д.

4. Определение требуемой точности результатов измерений (выходных параметров), области возможных изменений входных параметров и спецификации типов воздействий. Выбор типа образцов или объектов, подлежащих исследованию, при условии, что они соответствуют фактическому продукту с точки зрения состояния, устройства, формы, размеров и других характеристик.

На задание степени точности влияют условия изготовления и эксплуатации установки, которые будут использоваться для создания этих экспериментальных данных. Условия производства, то есть возможности производства, ограничивают наивысшую достижимую точность. Условия

эксплуатации, то есть условия для обеспечения нормальной работы установки, определяют минимальные требования к точности.

Точность экспериментальных данных также существенно зависит от объема (количества) испытаний – чем больше испытаний, тем (и при тех же условиях), тем выше надежность результатов.

В ряде случаев (с небольшим числом факторов и известным законом их распределения) можно заранее вычислить минимальное количество тестов, выполнение которых позволит получить результаты с требуемой точностью.

5. Составление плана и проведение эксперимента – количество и порядок испытаний, способ сбора, хранения и документирования данных.

Порядок проведения тестов важен, если входные параметры (факторы) при изучении одного и того же объекта в одном эксперименте принимают разные значения.

В ряде случаев, когда систематически действующие параметры трудно учесть и контролировать, они преобразуются в случайные, в частности, для случайного порядка тестирования (рандомизация эксперимента). Это позволяет применять методы математической статистики к анализу результатов.

Порядок испытаний также важен в процессе исследовательских исследований: в зависимости от выбранной последовательности действий, в экспериментальном поиске оптимального соотношения параметров объекта или какого-либо процесса может потребоваться более или менее экспериментов. Эти экспериментальные задачи аналогичны математическим задачам численного поиска оптимальных решений. Наиболее развитые методы одномерного поиска (однофакторные однообъектные задачи), такие как метод Фибоначчи, метод золотого сечения.

6. Статистическая обработка результатов эксперимента.

7. Объяснение полученных результатов и формулировка рекомендаций по их использованию, спецификация экспериментальной процедуры.

Снижение трудоемкости и сокращение сроков испытаний достигается с использованием автоматизированных экспериментальных комплексов. Такой комплекс включает в себя испытательные стенды с автоматической настройкой режимов (позволяет имитировать реальные режимы работы), автоматически обрабатывает результаты, проводит статистический анализ и изучение документов. Но ответственность инженера в этих исследованиях также велика: четко сформулированные цели тестов и правильно принятое решение позволяют точно находить слабую точку продукта, снижать затраты на разработку и итеративный процесс проектирования.

Основным экспериментам предшествовали несколько пробных опытов, необходимых для настройки расходомеров и поиска возможных неисправностей и конструктивных недостатков, в них проверялась возможность минимальной и максимальной загрузки форсунок имитирующих осадки, подбор необходимого минимального расхода воды для его фиксирования расходомером, а также проверялась его максимально возможная пропускная способность, были проверены физические свойства поролон для подтверждения возможности его использования в последующих экспериментах. Была проведена серия опытов по проверке возможности работы датчиков влажности почвы в поролоне, в ходе которых стало ясно, что они обладают высокой инерционностью в данной среде после полного насыщения водой всей толщины материала.

В начале был откалиброван один из расходомеров. Процедура калибровки заключалась в следующем: на расходомер подавались фиксированные объемы воды. В ходе проведения опыта было найдено какому объему равнялся один импульс (таблица 3.1), после чего была произведена тарировка второго расходомера.

Таблица 3.1 – Калибровка расходомера

Порядок выполнения эксперимента заключался в следующем: первым необходимым действием было задание начальных условий, которое подразумевает под собой регулировку шпилек для установки необходимых углов наклона берегов, установку продольного уклона русла, увлажнение водосбора, задание необходимых свойств подстилающей поверхности.

Вторым шагом эксперимента было подключение Arduino Nano к компьютеру и всех необходимых датчиков, после чего запускалась программа Arduino IDE. В этой программе запускался монитор порта, в котором отражаются данные, поступающие с датчиков влажности и двух расходомеров. Скриншот программы Arduino IDE и монитора порта с поступающими данными представлен на рисунке 3.11.

Перед запуском осадков, предварительно устанавливалась загрузка форсунок. В большинстве экспериментов запуск осадков осуществлялся спустя одну минуту после запуска воды в русло. В зависимости от типа эксперимента продолжительность осадков менялась от одной минуты до десяти минут. Если в начальных условиях эксперимента было необходимо иметь увлажненный водосбор, осуществлялся предварительный запуск на три минуты.

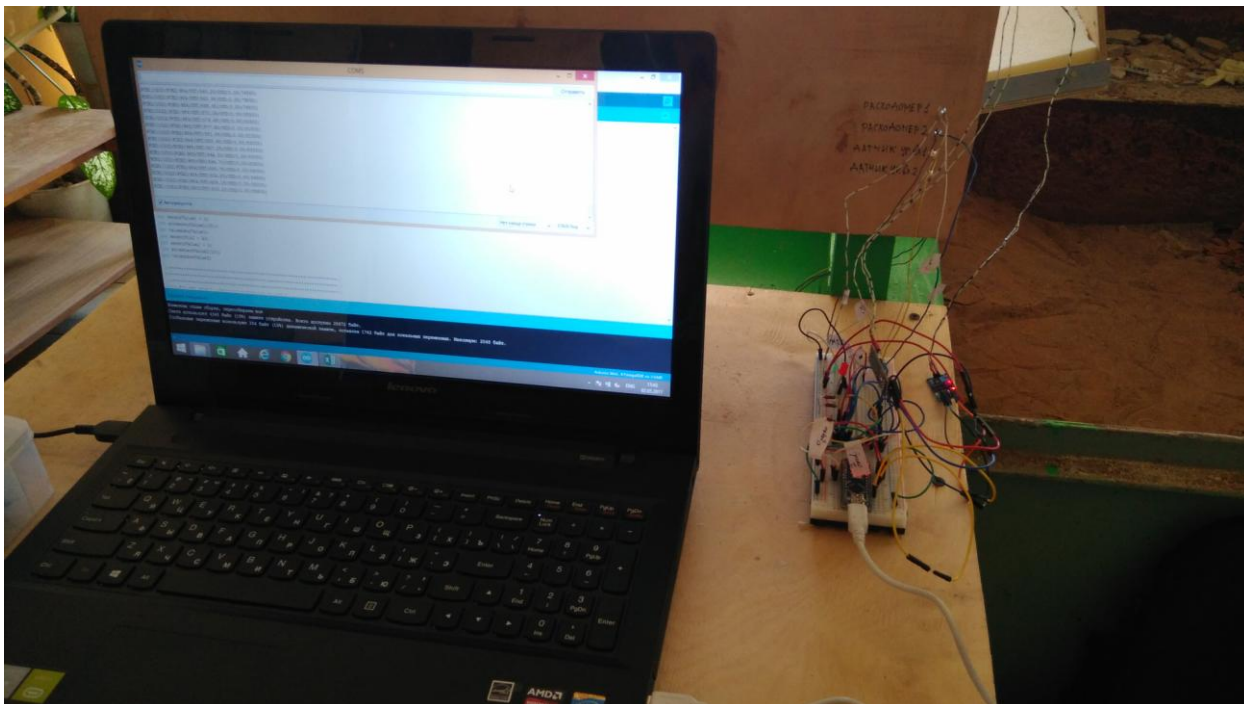


Рисунок 3.11 – Скриншот программы ArduinoIDEи монитора порта с поступающими данными

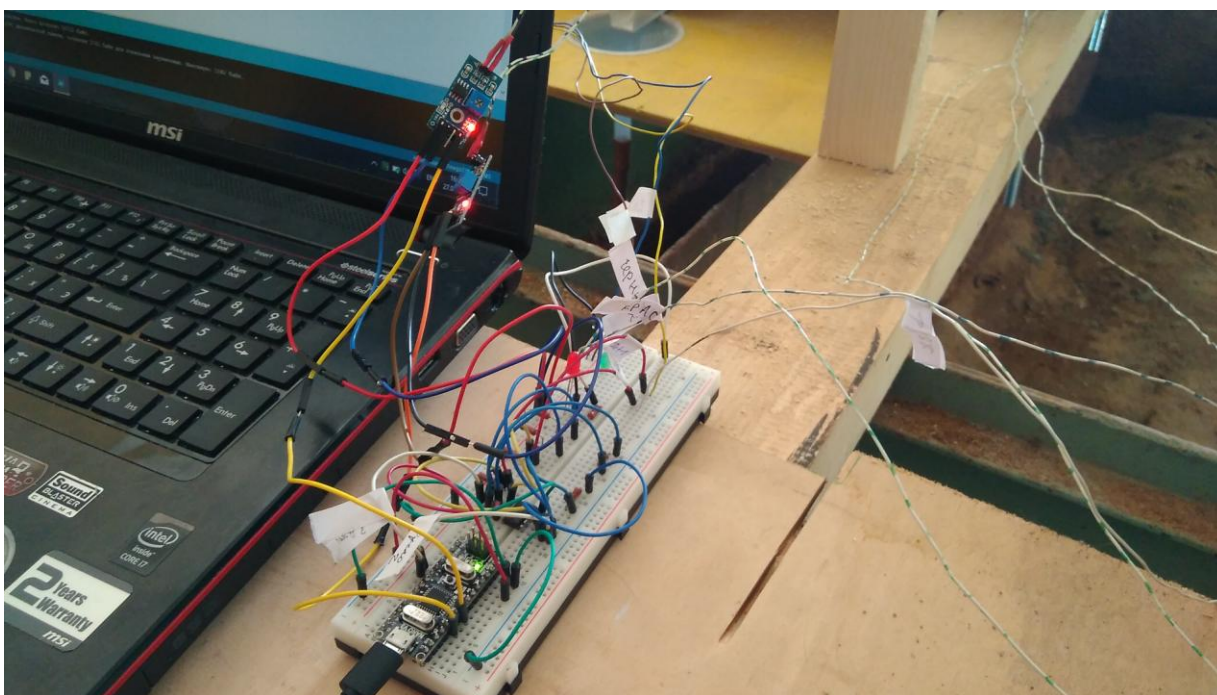


Рисунок 3.12 – Макетная плата с установленной на нее платой ArduinoNanосо всеми подключенными датчиками



Рисунок 3.13 – Процесс подачи на установку осадков

После завершения выпадения осадков, в зависимости от типа эксперимента, измерения велись от одной до пятнадцати минут.



Рисунок 3.14 – Процесс измерения характеристик водосбора после выпадения осадков

Всего было проведено 5 предварительных и 5 основных экспериментов.

Каждый эксперимент отличался разной степенью увлажнения водосбора, характером подстилающей поверхности и уклоном склонов водосбора. Исходные характеристики водосбора в каждом эксперименте представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Исходные характеристики водосбора

| № п/п                        | Дата | Степень увлажнения | Характер подстилающей поверхности | Уклон водосбора |
|------------------------------|------|--------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Предварительные эксперименты |      |                    |                                   |                 |
| 1                            |      |                    |                                   |                 |
| 2                            |      |                    |                                   |                 |
| 3                            |      |                    |                                   |                 |
| 4                            |      |                    |                                   |                 |
| 5                            |      |                    |                                   |                 |
| Основные эксперименты        |      |                    |                                   |                 |
|                              |      |                    |                                   |                 |
|                              |      |                    |                                   |                 |
|                              |      |                    |                                   |                 |
|                              |      |                    |                                   |                 |
|                              |      |                    |                                   |                 |

На рисунках 3.15 – 3.18 представлен общий вид экспериментальной установки при разных исходных характерах единичного водосбора.



Рисунок 3.15 – Уклон водосбора  $35^\circ$ , пористая и увлажненная подстилающая поверхность

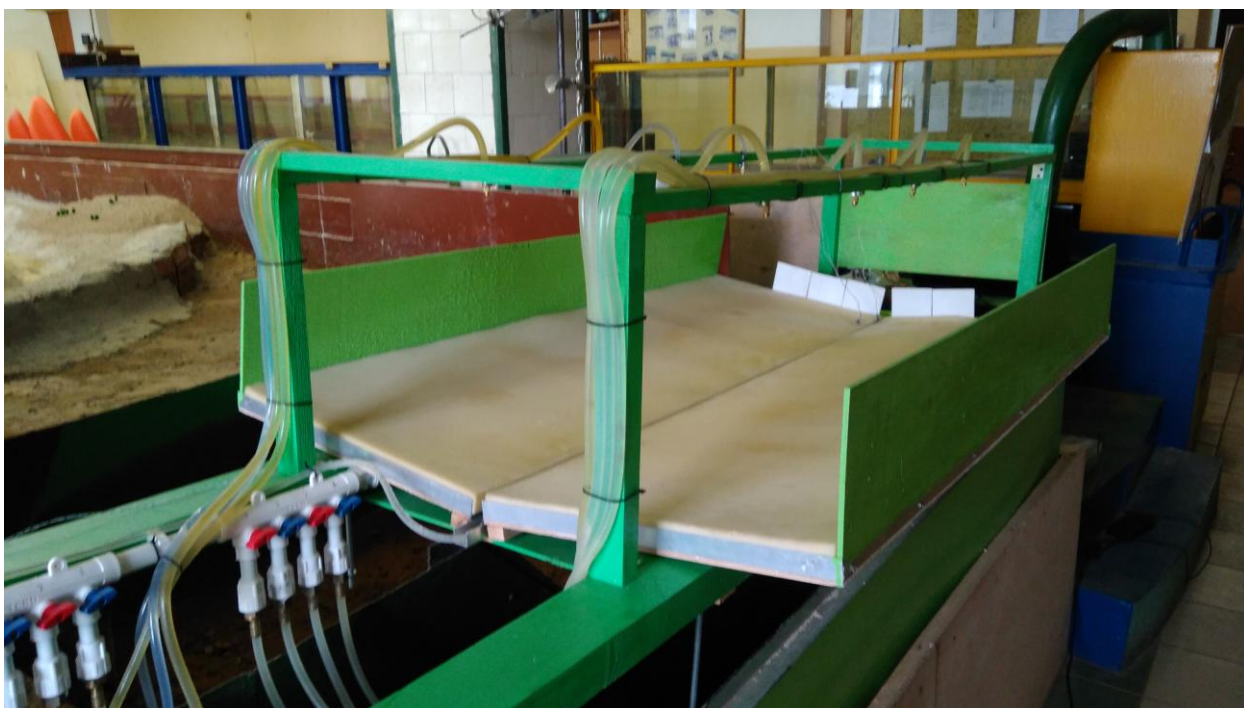


Рисунок 3.16 – Уклон водосбора  $5^\circ$ , пористая и увлажненная подстилающая поверхность



Рисунок 3.17 – Уклон водосбора  $5^\circ$ , 50% - ое перекрытие водосбора гладким материалом



Рисунок 3.18 – Уклон водосбора  $15^\circ$ , пористый и сухой водосбор

## 4 ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 4.1 Вид выходных экспериментальных данных

После завершения экспериментальной части исследования, полученные выходные данные с датчиков предавались обработке и анализу.

Вид выходных с датчиков данных представлен в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Вид выходных данных с датчиков

| №п/п | Датчик влажности почвы №1 | Данные с датчика №1 | Датчик влажности почвы №1 | Данные с датчика №2 | Выходной расходомер | Данные с расходомера, мл | Осадковый расходомер | Данные с осадкового расходомера, мл | Время, мс |
|------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------------------|-----------|
| 1    | PCH1                      | 1023                | PCH2                      | 1023                | UST                 | 8.10                     | OSD                  | 0.00                                | 500       |
| 2    | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1023                | UST                 | 12.15                    | OSD                  | 0.00                                | 1000      |
| 3    | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1023                | UST                 | 16.20                    | OSD                  | 0.00                                | 1500      |
| 4    | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1022                | UST                 | 21.60                    | OSD                  | 0.00                                | 2000      |
| 5    | PCH1                      | 1023                | PCH2                      | 1022                | UST                 | 25.65                    | OSD                  | 0.00                                | 2500      |
| 6    | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1022                | UST                 | 29.70                    | OSD                  | 0.00                                | 3000      |
| 7    | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1022                | UST                 | 32.40                    | OSD                  | 0.00                                | 3500      |
| 8    | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1022                | UST                 | 37.80                    | OSD                  | 0.00                                | 4000      |
| 9    | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1022                | UST                 | 40.50                    | OSD                  | 0.00                                | 4500      |
| 10   | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1022                | UST                 | 44.55                    | OSD                  | 0.00                                | 5000      |
| 11   | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1022                | UST                 | 48.60                    | OSD                  | 0.00                                | 5500      |
| 12   | PCH1                      | 1023                | PCH2                      | 1022                | UST                 | 52.65                    | OSD                  | 0.00                                | 6000      |
| 13   | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1022                | UST                 | 55.35                    | OSD                  | 0.00                                | 6500      |
| 14   | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1022                | UST                 | 60.75                    | OSD                  | 0.00                                | 7000      |
| 15   | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1022                | UST                 | 63.45                    | OSD                  | 0.00                                | 7500      |
| 16   | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1023                | UST                 | 67.50                    | OSD                  | 0.00                                | 8000      |
| 17   | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1023                | UST                 | 70.20                    | OSD                  | 0.00                                | 8500      |
| 18   | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1022                | UST                 | 74.25                    | OSD                  | 0.00                                | 9000      |
| 19   | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1022                | UST                 | 79.65                    | OSD                  | 0.00                                | 9500      |
| 20   | PCH1                      | 1022                | PCH2                      | 1022                | UST                 | 83.70                    | OSD                  | 0.00                                | 10000     |

|      |      |     |      |      |     |          |     |         |         |
|------|------|-----|------|------|-----|----------|-----|---------|---------|
| ...  | ...  | ... | ...  | ...  | ... | ...      | ... | ...     | ...     |
| 2094 | PCH1 | 896 | PCH2 | 1022 | UST | 17612.10 | OSD | 6386.85 | 1047000 |

#### 4.2 Построение хронологических графиков

По данным каждой из таблиц с экспериментальными значениями расхода воды и осадков были построены хронологические графики.

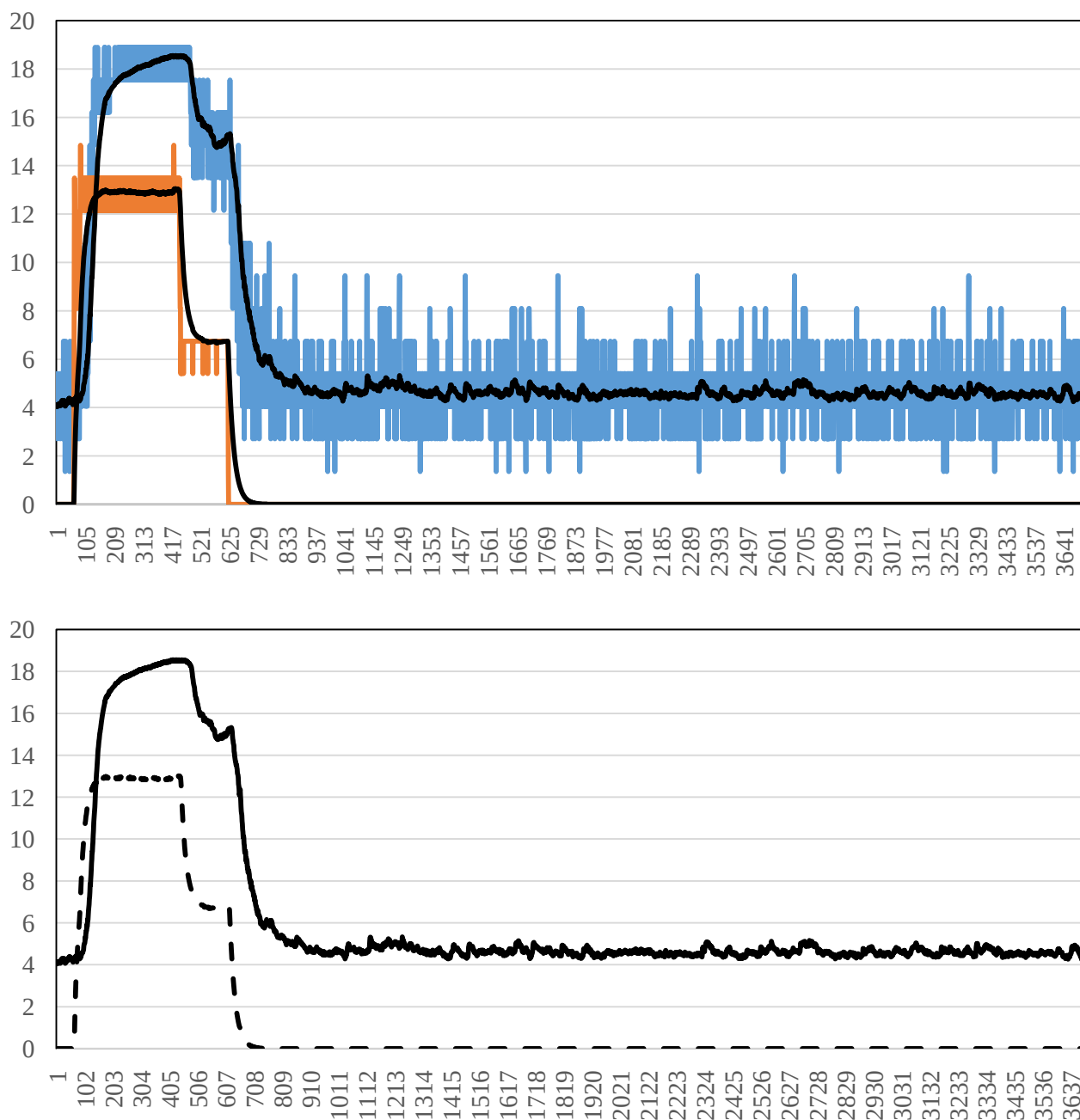


Рисунок 4.1 – Хронологический график хода расхода воды и осадков

#### 4.3 Расчёт коэффициента стока и времени добегания

#### 4.4. Анализ полученных результатов

Все проведенные эксперименты собраны в таблице(1-3 тестовые)(4-12 основные с различными начальными условиями)

№