



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

Кафедра водно-технических изысканий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему **ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ВОДОСБОРА**

Исполнитель Пнюшков Александр Дмитриевич
(фамилия, имя, отчество)

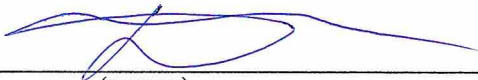
Руководитель К.Г.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

Консультант К.Т.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Гайдукова Екатерина Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

К.Г.Н., доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«13» июня 2022г.

Санкт-Петербург
2022

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА.	4
ГЛАВА 2. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	6
ГЛАВА 3. ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.	7
ГЛАВА 4. ИСПЫТАНИЯ.....	12
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ	16
ГЛАВА 7. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	27
7.1. моделирование влагоотдачи из снега. Модель Snowmelt Runoff Model(SRM).....	27
7.2 моделирование влагоотдачи из почвы. Модель Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdeln (HBV).....	34
ВЫВОД(КРИТИКА)	43
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ.....	44

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является создание физической модели водосбора, формирования речного стока. С помощью данной модели предполагается, что можно решать следующие задачи: наглядная демонстрация процессов формирования стока, проверка блоков математических моделей. В рамках поставленных задач было:

- Проведены опыты по формированию дождевых паводков.
- Опыт по определению кривой уменьшения запаса влаги из имитации подстилающей поверхности
- Проверка блока водоотдачи из снега модели Snowmelt Runoff Model (SRM)
- Проверка блока водоотдачи из почвы модели HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning)

ГЛАВА 1. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА.

Прежде чем начать моделировать различные процессы формирования стока, необходимо определить, что такое сток и какие факторы имеют определяющее значение, а какие вторичны. Так речной сток, определяют, как результат водного баланса, отражающий процессы в бассейне и, определяющий его водность. И выражают его в расходах [$\text{м}^3/\text{с}$], объёме стока [км^3], Модуле стока [$\text{л/с} \cdot \text{км}^2$], Слое стока [мм]. Можно выделить следующие основные факторы влияния на формирование стока в данный момент:

- Атмосферные осадки, которые в свою очередь разделяются на жидкие и(или) твёрдые. Они в свою очередь играют определяющую роль в увлажнении территории.
- Испарение. Испарение также играет важную роль в формировании и перераспределении стока, однако, стоит понимать, что на практике, например, уравнение водного баланса, оно рассматривается как расходная часть.
- Подземные воды

На формирование за многолетний период:

- Размер водосбора. Так для замкнутых водосборов норма климатического стока прежде всего определяется осадками и испарением. В свою очередь для не замкнутых водосборов этот список пополняется свойствами самого водосбора: характеристика почвогрунта, глубина врез русла, залегания водоносных горизонтов.
- Влияние озёр
- Влияние болот. Влияние болот не однозначно и зависит от типа болот, увлажнённости территории, и других физико-географических условий.
- Влияние высоты бассейна. Увеличение высоты приводит к увеличению разности между осадками и испарением, что в свою очередь увеличивает сток.

- Влияние леса. Лес изменяет количество осадков и величину испарения. Так над территорией леса выпадает на 10 – 20% больше осадков. И в тоже время за счёт транспирации увеличивается испарение.
- Влияние антропогенных факторов. К ним, можно отнести, вырубки лесов, урбанизация территорий, создание водохранилищ. [3]

ГЛАВА 2. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Один из видов моделирования является физическое моделирование. Физическое моделирование – это вид моделирования, суть которого заключается в замене объекта изучения или явления экспериментальным исследованием его модели, имеющий ту же физическую природу. [1] Исходя из определения можно уже выявить основное преимущество над математическим моделированием – физическая модель за счёт одной природы позволяет учитывать не самые очевидные факторы, влияющие на происходящие процессы. С другой стороны, возникает проблема производства работ, а именно необходимо создать саму модель, что в свою очередь требует довольно весомых финансовых затрат.

В гидрологии прежде всего распространено гидравлическое моделирование, которое применяется для обоснования различных проектных решений, в частности, мостовых переправ, переходов ЛЭП и п. р. [4] Физическое моделирование процессов, происходящих на водосборе менее распространено. В рамках данной работы наибольший интерес представляют труды, которые были проведены в рамках работ проведённых по определению влияния мелиоранта-структурообразователя на почву при орошении дождеванием под авторством Нозадзе Л.Р.

ГЛАВА 3. ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.

Модель представляет из себя два склона водосбора, выполненных из фанеры с листом поролона, имитирующим подстилающую поверхность. Сток воды осуществляется в алюминиевый желоб, имитирующий русло. Осадки на водосбор подаются через шесть форсунок с индивидуальной подачей от распределительного коллектора из магистрального трубопровода. Индивидуальная подача обеспечивается силиконовыми трубками диаметром 8 мм по три на каждый склон. Жесткость конструкции обеспечивает рама из металлического профиля сечением 40х40 мм. Рисунок 3.1

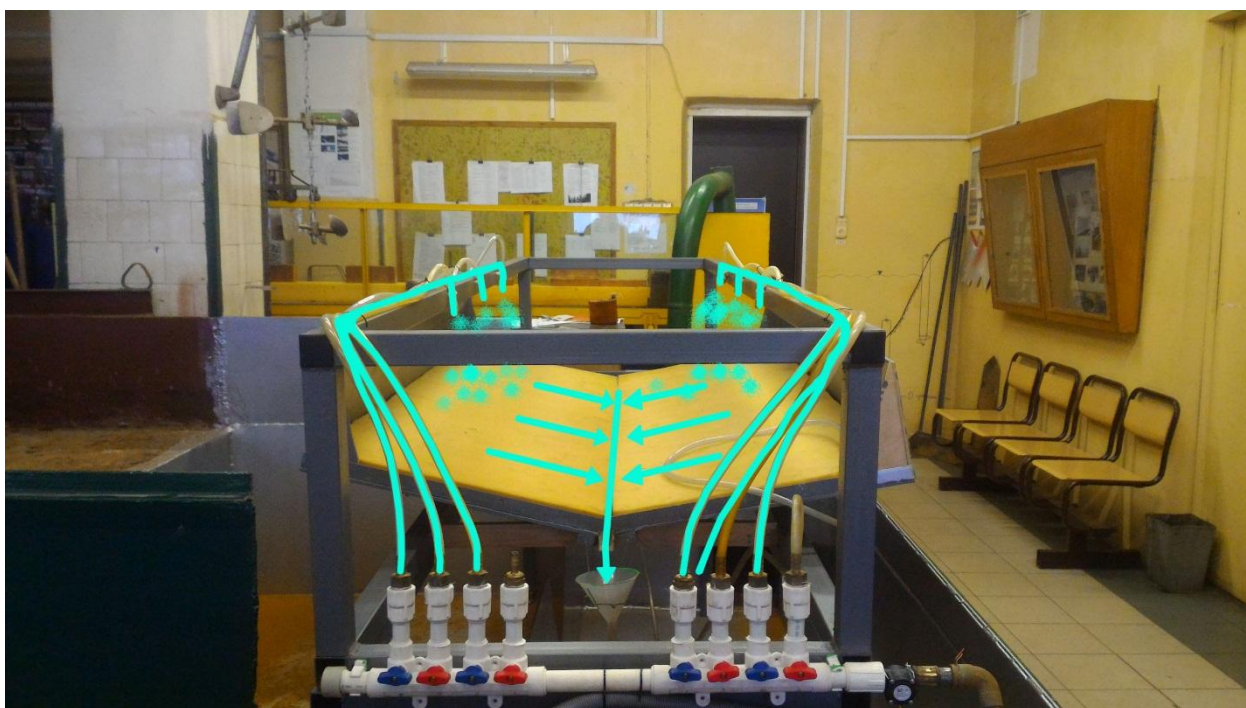


Рисунок 3.1 – Установка и схема подачи и отведения воды.

Измерение расхода поступающей в качестве дождя воды и ушедшей в качестве стока осуществляется с помощью двух датчиков YF-S201. Рабочий диапазон, заявленный производителем, расхода воды составляет от 1 л/мин до 30 л/мин, что в общем соответствует действительности т.к. при меньших расходах можно наблюдать шумы (показания расходов принимают значения равные нулю, что в свою очередь не соответствует действительности) Пример такого измерения изображён на графике Рисунок 3.2

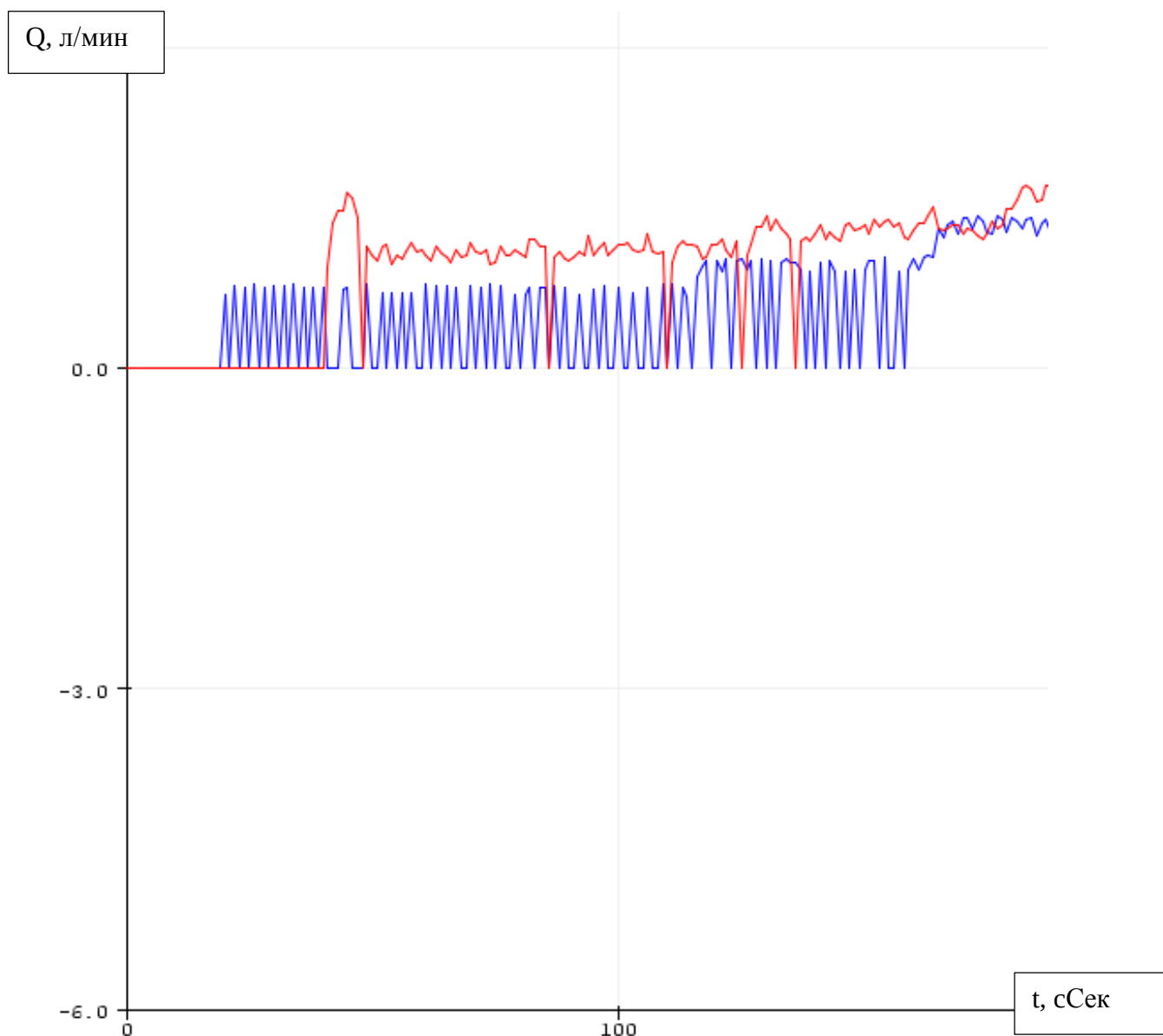


Рисунок 3.2. Расходы воды меньше допустимого. (Синим отмечен расход датчика, через который уходит стоковая вода, красным – поданная)

Для объяснения причин необходимо кратко осветить принцип работы датчика. Основан он на эффекте Холла (возникновение напряжения при изменении магнитного поля) соответственно расходомер состоит из ротора с магнитом датчика холла и корпуса. [7] Важно понимать, что датчик должен находиться в горизонтальном положении и быть внутри полностью заполненным водой, для чего стоковый датчик был помещён в U-образное колено. Так же для исключения влияния на работу датчиков был установлен

фильтр для воды. Исходя из выше перечисленного получаем, что предполагаемое объяснение заключается в том, что лопасти ротора за счёт недостаточного давления не способны стабильно проворачиваться, а как следствие магнит не изменяет поле и необходимый сигнал не поступает на плату с программным обеспечением.

Заявленная производителем датчика точность определения расхода составляет 10%. Для повышения точности была проведена калибровка, по результатам которой стало изменение градуировочного коэффициента. Связь расходов, измеренных с помощью датчиков и объёмным способом представлена в виде графика на рисунке 3.3.

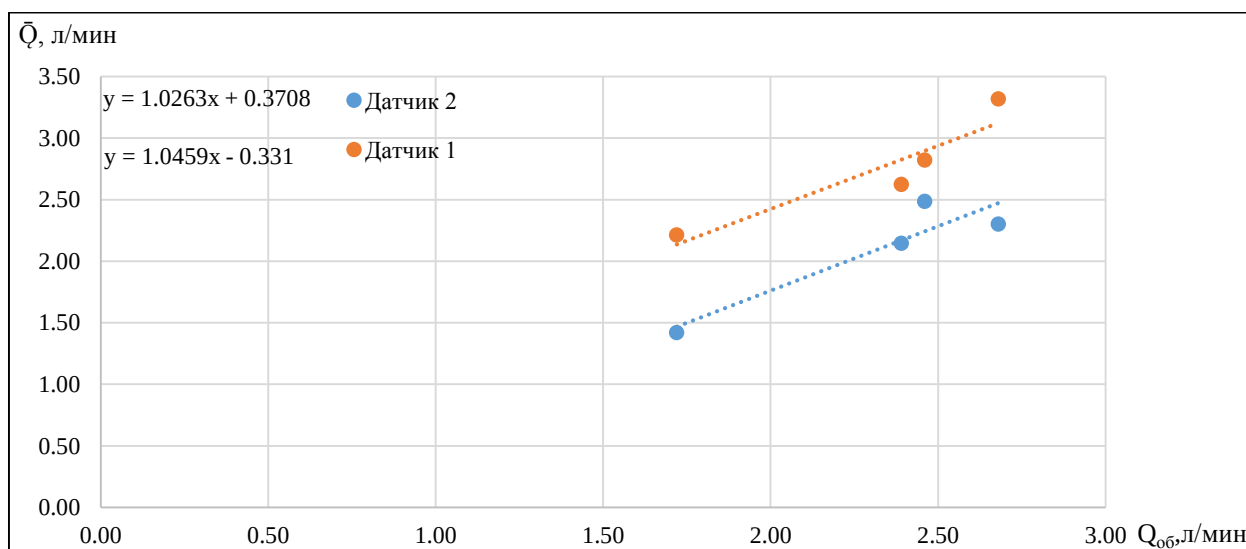


Рисунок 3.3. Связь расходов, измеренных с помощью датчиков и объёмным способом

Далее рассмотрим непосредственно плату для обработки поступающего сигнала. В качестве таковой была использована Arduino UNO на базе микроконтроллера ATMEGA328P. Рисунок 3.4.

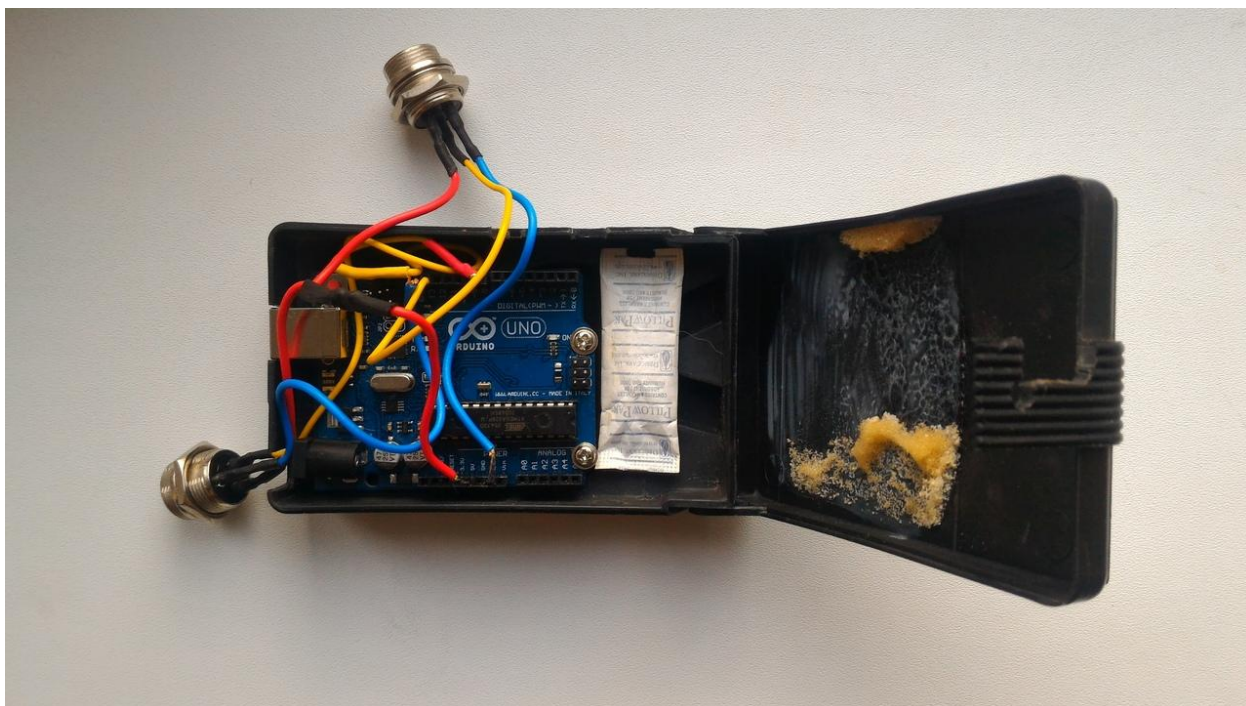


Рисунок 3.4. Плата в корпусе с разъёмами для подключения датчиков.

Конкретно этот микроконтроллер был выбран в связи с тем, что не возникает проблем, связанных с подключением к персональному компьютеру (ПК), в отличие от платы, основанной на микроконтроллере ATMEGA 8U2, что в нашей ситуации крайне важно т.к. визуализация данных и программирование осуществляется через ПК.

Программный комплекс состоит из двух частей:

- ПО, установленного на ПК
- Программы (скетч), загружаемый в микроконтроллер.

В качестве ПО на ПК использовалось Arduino IDE версии 1.8.13, чей функционал позволяет проводить все необходимые операции:

- Загрузка на микроконтроллер скетча.
- Получение данных в виде массива данных.
- Визуализация поступающих данных в качестве одного или нескольких графиков. [9]

Скетч представляет собой программу на адаптированном языке, схожем с C++. Как отмечалось выше датчик работает на основе сигналов от датчика холла, возникающих от вращения ротора с магнитом, существует два варианта

реализации расчёта расхода воды:

- 1) Основанный на длительности сигнала.
- 2) Основанный на количестве сигналов за единицу времени.

Выбор пал на первый вариант т.к. он после доработок, которые увеличивают длину кода, примерно, на треть, позволяет к одной плате подсоединить сразу два датчика также он имеет меньший объём памяти (20 строк в не доработанном 2-м случае, против 21-й в доработанном)

```

FLOAT PINSENSOR = 8;
FLOAT PINSENSORI = 13;
FLOAT VARPULSE;
FLOAT VARPULSEI;
FLOAT VARRESULT;
FLOAT VARRESULTI;

VOID SETUP(){
  SERIAL.BEGIN(9600);
  SERIAL.FLUSH();
  SERIAL.PRINTLN("PIN8,PIN13");
  PINMODE(PINSENSOR, INPUT);
}

VOID LOOP(){
  VARPULSE=PULSEIN(PINSENSOR, HIGH, 200000);
  VARPULSEI=PULSEIN(PINSENSORI, HIGH, 200000);
  IF(VARPULSE){VARRESULT=FLOAT(1000000/(15*VARPULSE));}
  ELSE {VARRESULT=0;}
  IF(VARPULSEI){VARRESULTI=FLOAT(1000000/(15*VARPULSEI));}
  ELSE {VARRESULTI=0;}
  SERIAL.PRINTLN(VARRESULT);
  SERIAL.PRINT(",");
  SERIAL.PRINTLN(VARRESULTI);
}
```

ГЛАВА 4. ИСПЫТАНИЯ

Всего в рамках работы было проведено трое испытаний:

- 1) Испытания датчиков. В ходе испытания датчиков была проверена работоспособность датчиков и их взаимодействия с микроконтроллером. Проводились путём подключения обоих датчиков непосредственно в водопроводную сеть.
- 2) Отладочные испытания. Проводились уже с задействованием всей установки. В результате обнаружился ряд недостатков: засорение датчика мусором, низкое качество проводки.
- 3) Итоговые испытания. Итоговые испытания проводились после отладки оборудования: была заменена проводка. Рисунок 3, и поставлены фильтры воды перед датчиками.

Ход итоговых испытаний:

- 1) Включение подачи воды (условной реки) Рисунок 4.1

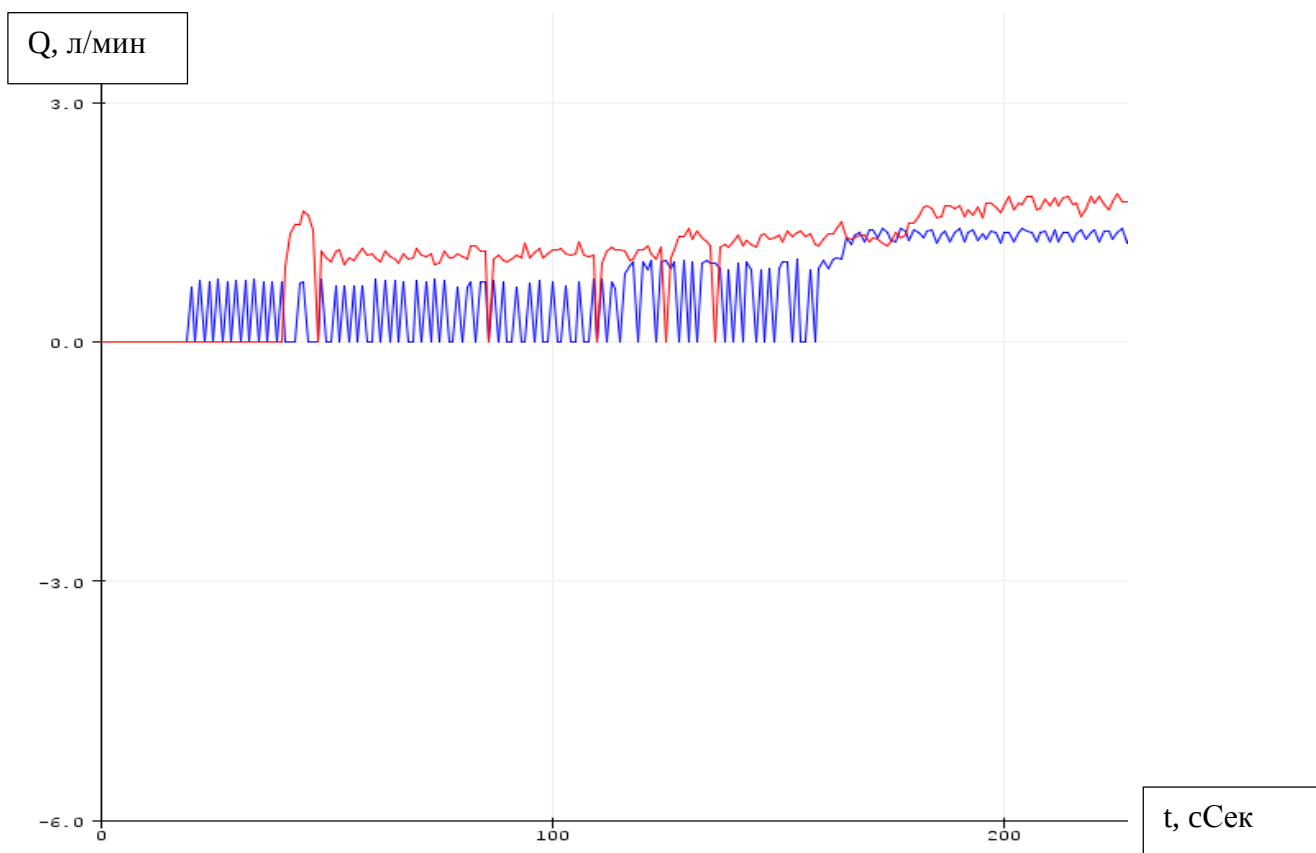


Рисунок 4.1. сток условной реки. Красным обозначена подача воды, синим сток. По оси абсцисс время, в секундах; по оси ординат расход, л/мин

2) Подключение подачи воды через распыляющие форсуноки Рисунок 6. Форсунки, имитирующие осадки были подключены в момент равный 1082 с, что видно по Рисунку 4.2.

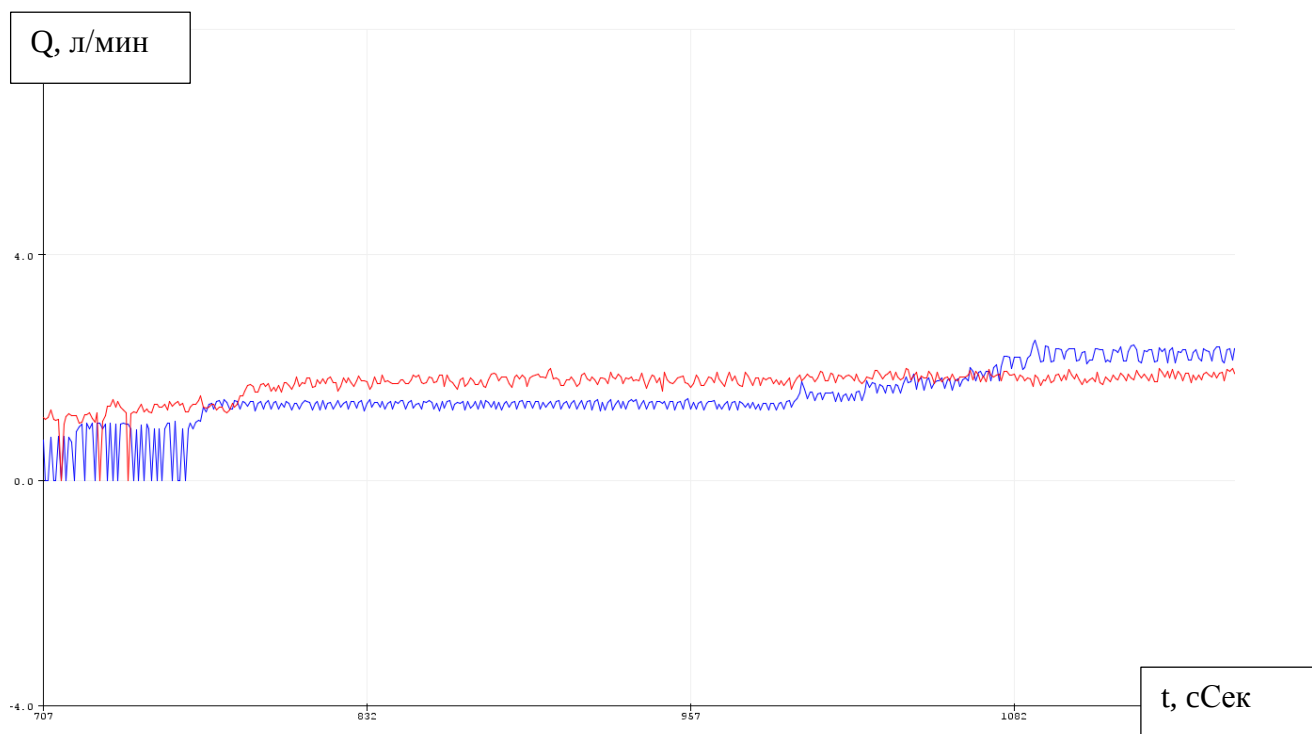


Рисунок 4.2. Сток реки с осадками, обозначения аналогичны рисунку 4.1.

3) Следующим этапом было наблюдение за установлением режима. Рисунок 4.3.

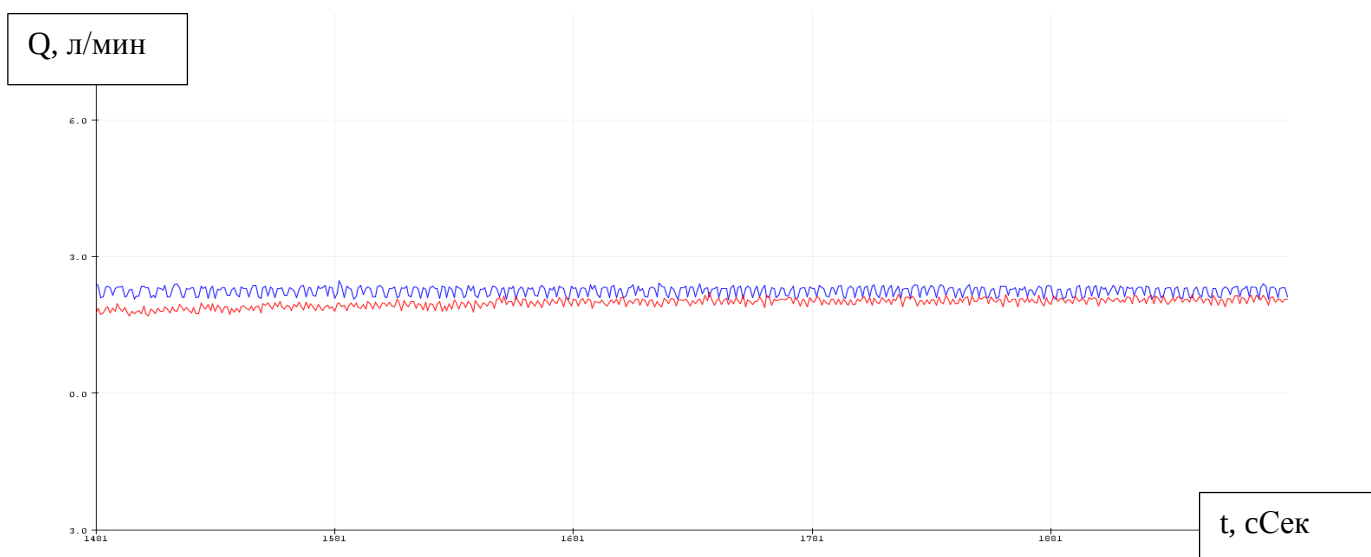


Рисунок 4.3. Установление режима, обозначения аналогичны рисунку 4.1

4) Отключение дождевых форсунок Рисунок 4.4

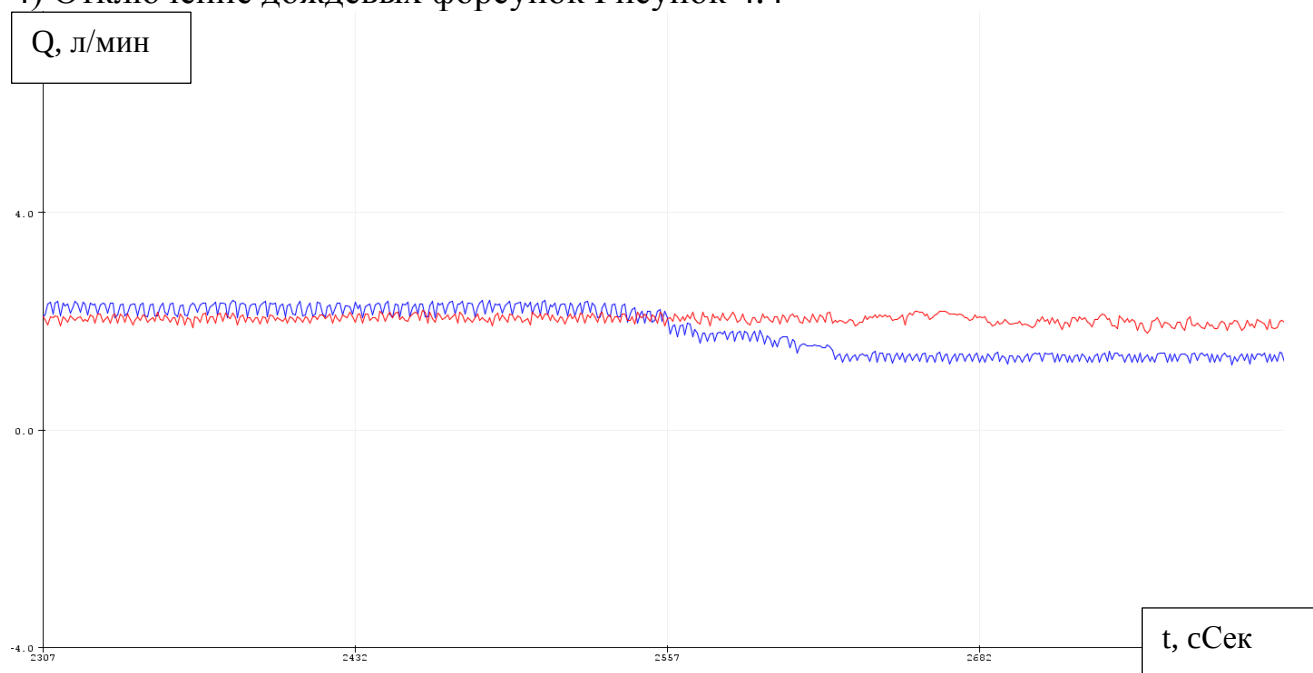


Рисунок 4.4. отключение форсунок, имитирующих осадки, обозначения аналогичны рисунку 4.1

5) Завершение испытания. Рисунок 4.5.

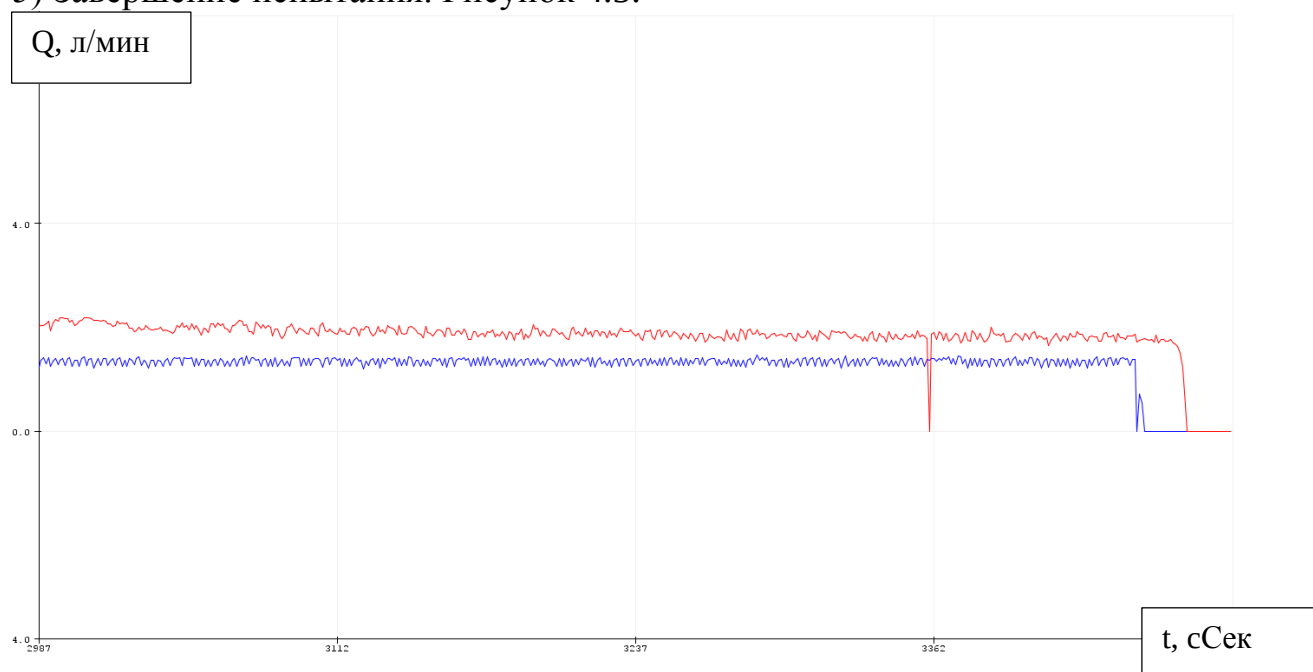


Рисунок 4.5 завершение испытания, обозначения аналогичны рисунку 4.1.

В результате испытания можно отметить одну важную особенность:

графики представляют собой не совсем прямые линии, а скачкообразные.

Исправить это можно несколькими различными способами:

- Вариант первый: в скетче прописать сглаживающий фильтр.
- Второй вариант: прописать в скетче больший период опроса датчика
- Отфильтровать вручную в процессе постобработки.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В рамках работы было проведён ряд экспериментов, при заданных условиях водосбора: продольный уклон 6 ‰ поперечный уклон 30 ‰. Всего было поставлено четыре серии пусков. Суть заключалась в том, чтобы осуществить серию подач равной интенсивности за равные промежутки времени и пронаблюдать реакцию. После опыта мы получаем “сырые” данные, которые отображены в виде графиков на рисунках 5.1 – 5.4

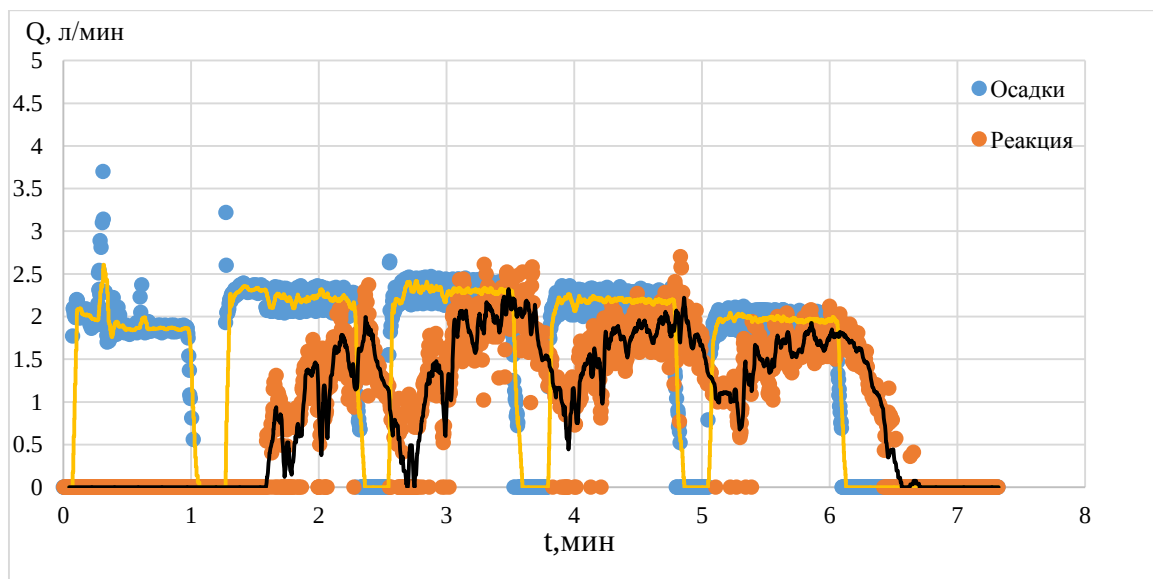


Рисунок 5.1. Необработанные данные 1-го опыта: 1 мин. подачи 0,25 мин. ожидания. Синее поле точек – расходы поданной воды, оранжевое поле точек – сток.

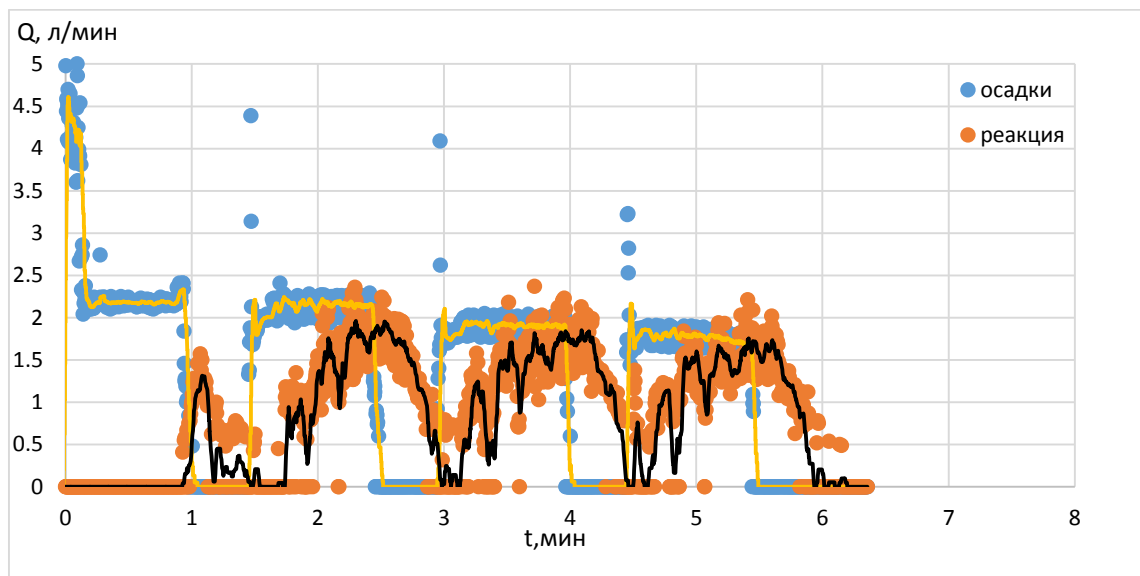


Рисунок 5.2. Необработанные данные 2-го опыта: 1 мин. подачи 0,5 мин. ожидания. Синее поле точек – расходы поданной воды, оранжевое поле точек – сток.

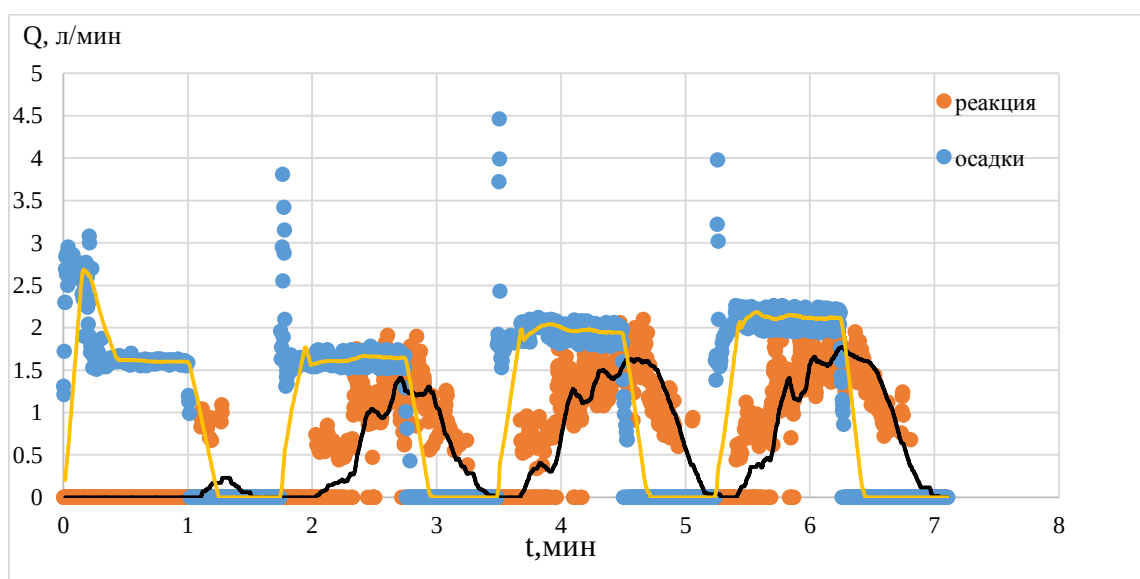


Рисунок 5.3. Необработанные данные 3-го опыта: 1 мин. подачи 0,75 мин. ожидания. Синее поле точек – расходы поданной воды, оранжевое поле точек – сток.

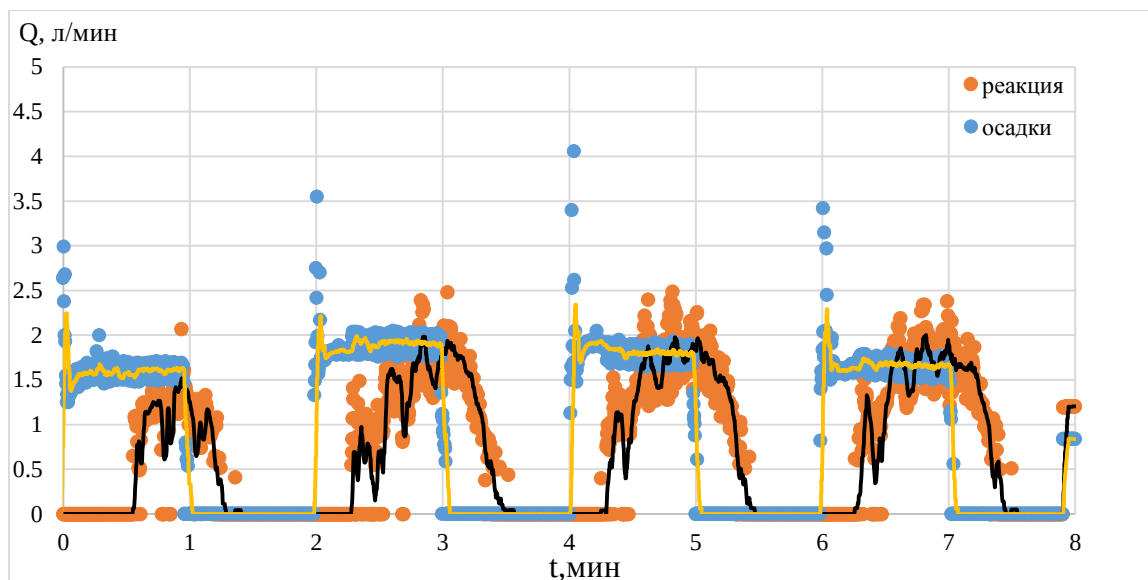


Рисунок 5.4. Необработанные данные 4-го опыта: 1 мин. подачи 1 мин. ожидания. Синее поле точек – расходы поданной воды, оранжевое поле точек – сток.

После получения данных их необходимо адаптировать для дальнейшей обработки: было принято решение масштабировать время и принять 15 сек за 1 день, следовательно, подача осадков каждый раз осуществлялась минуту т.е. 4 дня. Датчики расходов имеют погрешность порядка 10% к тому же измерение осуществляется с частотой 6 раз в секунду, что является избыточным. Также осадки перевести в мм. Итоги обработки представлены в Таблицах 5.1 – 5.4. По результатам таблиц 1 – 4 были построены графики, изображённые на рисунках 5.5 – 5.8

Табл.5.1. Результаты обработки данных опыта №1.

t, мин	t, сек	t, дней	Q _{вход} , л/мин	Q _{вход} , мм	Q _{вых} , л/мин	Q _{вых} , мм	W _{вход} , л	W _{вых} , л
0	0	0	0	0	0,000	0	0,000	0,000
0,25	15	1	1,9	320	0,000	0	0,475	0,000
0,5	30	2	1,9	320	0,000	0	0,475	0,000
0,75	45	3	1,9	320	0,000	0	0,475	0,000

1	60	4	1,9	320	0,000	0	0,475	0,000
1,25	75	5	0	0	0,000	0	0,000	0,000
1,5	90	6	2,25	379	0,000	0	0,563	0,000
1,75	105	7	2,25	379	0,000	0	0,563	0,000
2	120	8	2,25	379	0,750	126	0,563	0,188
2,25	135	9	2,25	379	1,400	236	0,563	0,350
2,5	150	10	0	0	1,500	253	0,000	0,375
2,75	165	11	2,25	379	1,000	168	0,563	0,250
3	180	12	2,25	379	0,000	0	0,563	0,000
3,25	195	13	2,25	379	1,400	236	0,563	0,350
3,5	210	14	2,25	379	2,000	337	0,563	0,500
3,75	225	15	0	0	2,100	354	0,000	0,525
4	240	16	2,25	379	1,350	227	0,563	0,338
4,25	255	17	2,25	379	1,000	168	0,563	0,250
4,5	270	18	2,25	379	1,500	253	0,563	0,375
4,75	285	19	2,25	379	1,800	303	0,563	0,450
5	300	20	0	0	2,000	337	0,000	0,500
5,25	315	21	2	337	1,750	295	0,500	0,438
5,5	330	22	2	337	1,250	210	0,500	0,313
5,75	345	23	2	337	1,500	253	0,500	0,375
6	360	24	2	337	1,750	295	0,500	0,438
6,25	375	25	0	0	1,750	295	0,000	0,438
6,5	390	26	0	0	1,250	210	0,000	0,313
6,75	405	27	0	0	0,000	0	0,000	0,000

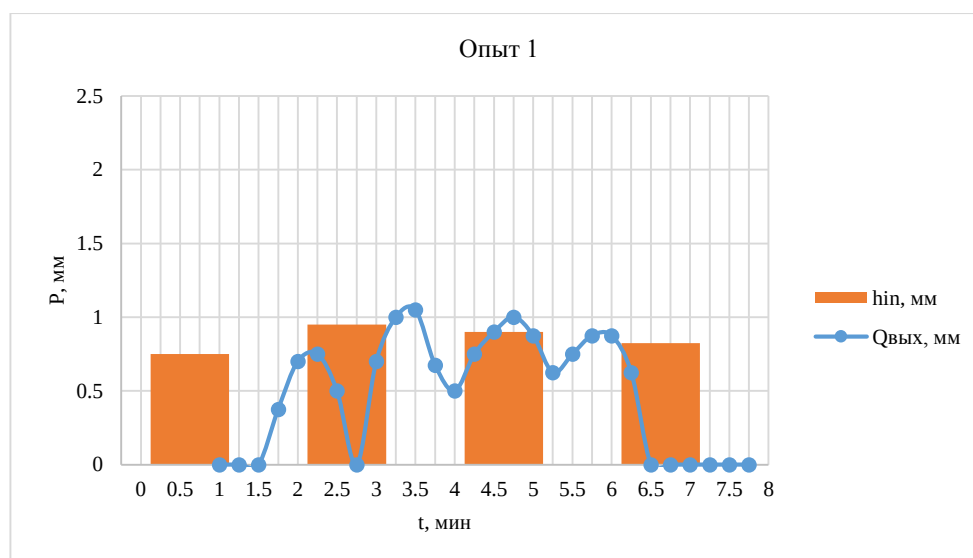


Рисунок 5.5. Обработанные результаты опыта № 1

Табл.5.2. Результаты обработки данных опыта №2.

t, мин	t, сек	t, дней	Q _{вход} , л/мин	Q _{вход} , мм	Q _{вых} , л/мин	Q _{вых} , мм	W _{вход} , л	W _{вых} , л
0	0	0	0,0	0	0,000	0	0,000	0,000
0,25	15	1	1,5	253	0,000	0	0,375	0,000
0,5	30	2	1,5	253	0,000	0	0,375	0,000
0,75	45	3	1,5	253	1,200	202	0,375	0,300
1	60	4	1,5	253	1,200	202	0,375	0,300
1,25	75	5	0,0	0	0,250	42	0,000	0,063
1,5	90	6	0,0	0	0,000	0	0,000	0,000
1,75	105	7	0,0	0	0,000	0	0,000	0,000
2	120	8	0,0	0	0,000	0	0,000	0,000
2,25	135	9	1,9	320	0,000	0	0,475	0,000
2,5	150	10	1,9	320	0,700	118	0,475	0,175
2,75	165	11	1,9	320	1,600	269	0,475	0,400
3	180	12	1,9	320	1,800	303	0,475	0,450
3,25	195	13	0,0	0	1,250	210	0,000	0,313
3,5	210	14	0,0	0	0,000	0	0,000	0,000

3,75	225	15	0,0	0	0,000	0	0,000	0,000
4	240	16	0,0	0	0,000	0	0,000	0,000
4,25	255	17	1,8	303	0,000	0	0,450	0,000
4,5	270	18	1,8	303	1,250	210	0,450	0,313
4,75	285	19	1,8	303	1,800	303	0,450	0,450
5	300	20	1,8	303	1,800	303	0,450	0,450
5,25	315	21	0	0	1,450	244	0,000	0,363
5,5	330	22	0	0	0,000	0	0,000	0,000
5,75	345	23	0	0	0,000	0	0,000	0,000
6	360	24	0	0	0,000	0	0,000	0,000
6,25	375	25	1,65	278	0,000	0	0,413	0,000
6,5	390	26	1,65	278	1,150	194	0,413	0,288
6,75	405	27	1,65	278	1,650	278	0,413	0,413
7	420	28	1,65	278	1,650	278	0,413	0,413
7,25	435	29	0	0	1,250	210	0,000	0,313
7,5	450	30	0	0	0,000	0	0,000	0,000
7,75	465	31	0	0	0,000	0	0,000	0,000
8	480	32	0	0	0,000	0	0,000	0,000

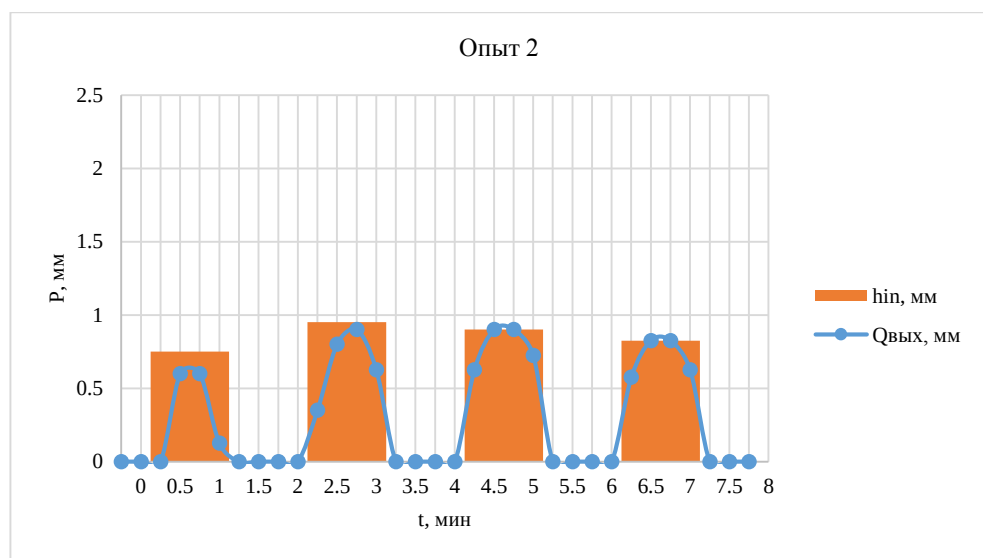


Рисунок 5.6. Обработанные результаты опыта № 2

Табл.5.3. Результаты обработки данных опыта №3.

t, мин	t, сек	t, дней	Q _{вход} , л/мин	Q _{вход} , мм	Q _{вых} , л/мин	Q _{вых} , мм	W _{вход} , л	W _{вых} , л
0	0	0	0	0	0,000	0	0,000	0,000
0,25	15	1	2,2	370	0,000	0	0,550	0,000
0,5	30	2	2,2	370	0,000	0	0,550	0,000
0,75	45	3	2,2	370	0,000	0	0,550	0,000
1	60	4	2,2	370	0,250	42	0,550	0,063
1,25	75	5	0	0	0,500	84	0,000	0,125
1,5	90	6	0	0	0,250	42	0,000	0,063
1,75	105	7	2,1	354	0,000	0	0,525	0,000
2	120	8	2,1	354	1,250	210	0,525	0,313
2,25	135	9	2,1	354	1,750	295	0,525	0,438
2,5	150	10	2,1	354	1,900	320	0,525	0,475
2,75	165	11	0	0	1,400	236	0,000	0,350
3	180	12	0	0	0,500	84	0,000	0,125
3,25	195	13	1,9	320	1,250	210	0,475	0,313
3,5	210	14	1,9	320	1,500	253	0,475	0,375
3,75	225	15	1,9	320	1,750	295	0,475	0,438
4	240	16	1,9	320	1,750	295	0,475	0,438
4,25	255	17	0	0	1,300	219	0,000	0,325
4,5	270	18	0	0	0,500	84	0,000	0,125
4,75	285	19	1,8	303	1,100	185	0,450	0,275
5	300	20	1,8	303	1,500	253	0,450	0,375
5,25	315	21	1,8	303	1,500	253	0,450	0,375
5,5	330	22	1,8	303	1,500	253	0,450	0,375

5,75	345	23	0	0	1,200	202	0,000	0,300
6	360	24	0	0	0,000	0	0,000	0,000
6,25	375	25	0	0	0,000	0	0,000	0,000
6,5	390	26	0	0	0,000	0	0,000	0,000
6,75	405	27	0	0	0,000	0	0,000	0,000
7	420	28	0	0	0,000	0	0,000	0,000
7,25	435	29	0	0	0,000	0	0,000	0,000
7,5	450	30	0	0	0,000	0	0,000	0,000
7,75	465	31	0	0	0,000	0	0,000	0,000
8	480	32	0	0	0,000	0	0,000	0,000

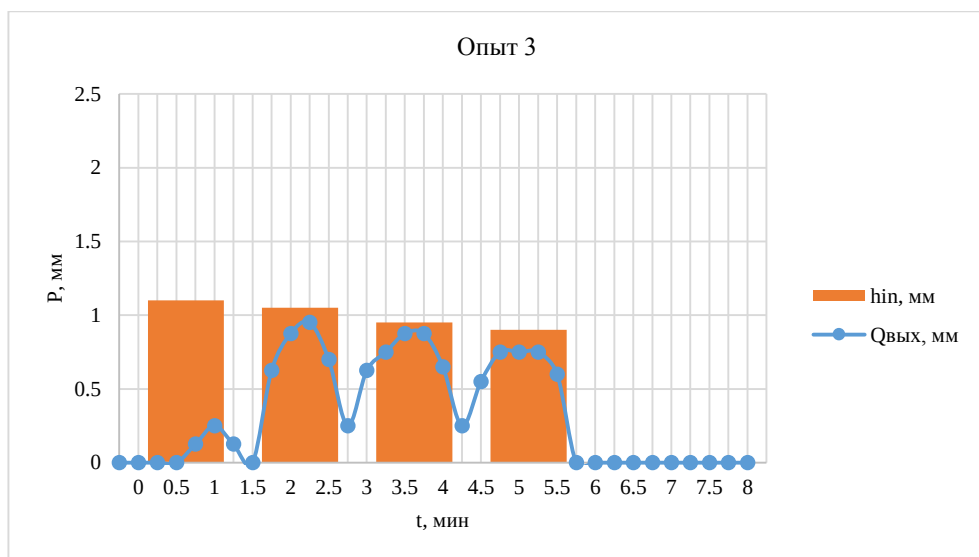


Рисунок 5.7. Обработанные результаты опыта № 3

Табл.5.4. Результаты обработки данных опыта №4.

t , мин	t , сек	t , дней	$Q_{\text{ВХОД}}$, л/мин	$Q_{\text{ВХОД}}$, мм	$Q_{\text{ВЫХ}}$, л/мин	$Q_{\text{ВЫХ}}$, мм	$W_{\text{ВХОД}}$, л	$W_{\text{ВЫХ}}$, л
0	0	0	0	0	0,00	0	0,00	0,000
0,25	15	1	1,6	269	0,00	0	0,40	0,000
0,5	30	2	1,6	269	0,00	0	0,40	0,000
0,75	45	3	1,6	269	0,00	0	0,40	0,000

1	60	4	1,6	269	0,00	0	0,40	0,000
1,25	75	5	0	0	1,00	168	0,00	0,250
1,5	90	6	0	0	0,00	0	0,00	0,000
1,75	105	7	0	0	0,00	0	0,00	0,000
2	120	8	1,6	269	0,00	0	0,40	0,000
2,25	135	9	1,6	269	0,50	84	0,40	0,125
2,5	150	10	1,6	269	1,00	168	0,40	0,250
2,75	165	11	1,6	269	1,40	236	0,40	0,350
3	180	12	0	0	0,70	118	0,00	0,175
3,25	195	13	0	0	0,00	0	0,00	0,000
3,5	210	14	0	0	0,00	0	0,00	0,000
3,75	225	15	2	337	0,70	118	0,50	0,175
4	240	16	2	337	1,20	202	0,50	0,300
4,25	255	17	2	337	1,50	253	0,50	0,375
4,5	270	18	2	337	1,70	286	0,50	0,425
4,75	285	19	0	0	1,25	210	0,00	0,313
5	300	20	0	0	0,00	0	0,00	0,000
5,25	315	21	0	0	0,80	135	0,00	0,200
5,5	330	22	2,15	362	1,50	253	0,53	0,375
5,75	345	23	2,15	362	1,60	269	0,53	0,400
6	360	24	2,15	362	1,60	269	0,53	0,400
6,25	375	25	2,15	362	1,70	286	0,53	0,425
6,5	390	26	0	0	1,30	219	0,00	0,325
6,75	405	27	0	0	0,00	0	0,00	0,000

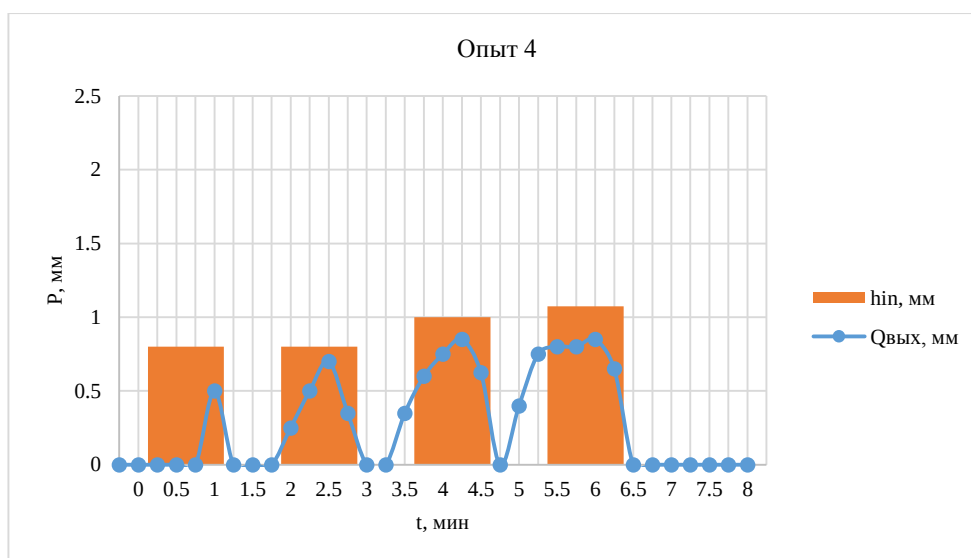


Рисунок 5.8. Обработанные результаты опыта № 4

Второй блок состоит из эксперимента по определению уменьшения запасов влаги на склонах водосбора. Заключался опыт в том, что сначала склоны были полностью насыщены влагой, а затем производилось взвешивание. Результаты, которые как мы предполагаем описывают уменьшения запасов влаги представлены в виде графиков на рисунках 5.9 – 5.10

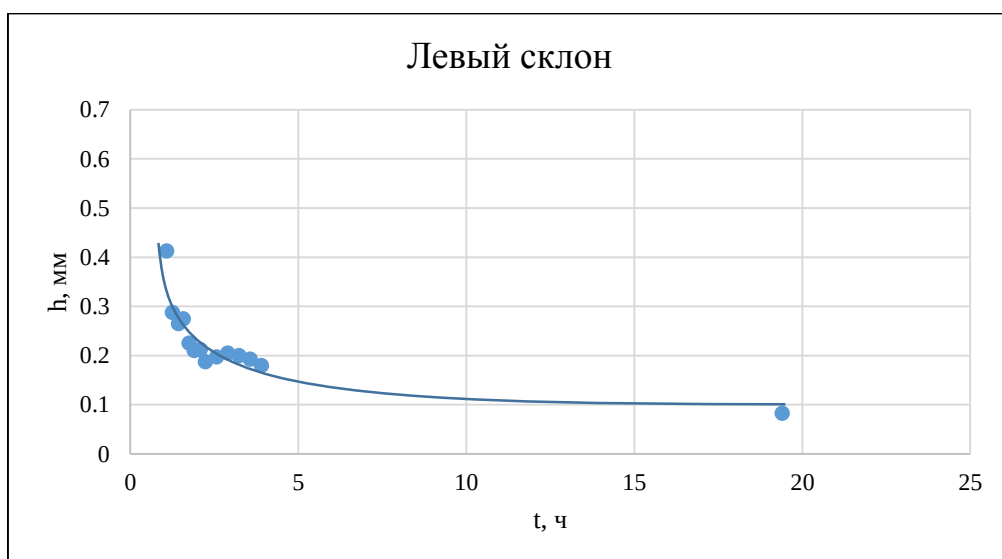


Рисунок 5.9. Кривая уменьшения запасов влаги на левом склоне водосбора.

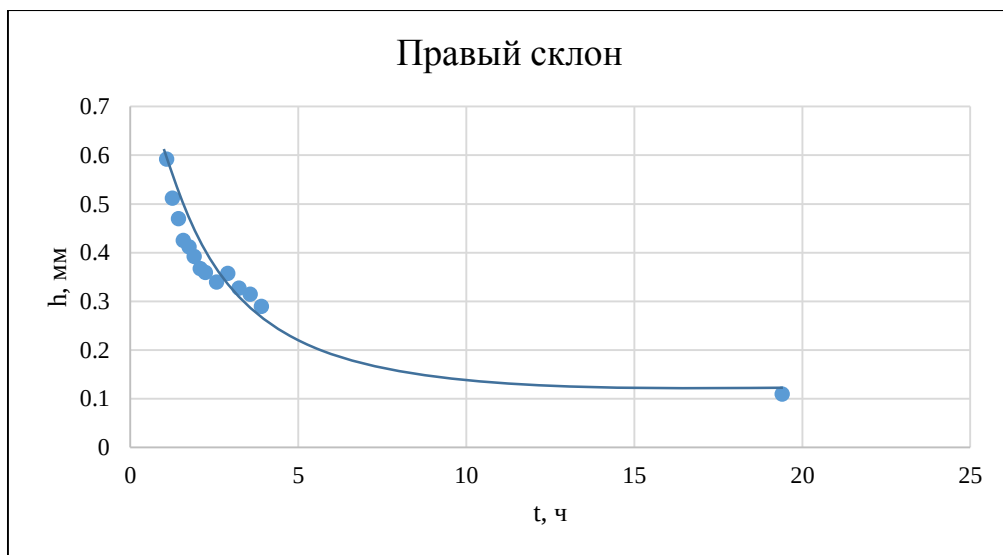


Рисунок 5.10. Кривая уменьшения запасов влаги на правом склоне водосбора

ГЛАВА 6. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

6.1. моделирование влагоотдачи из снега. Модель Snowmelt Runoff Model(SRM)

Модель Snowmelt Runoff Model(SRM) – довольно распространённая модель. Интересующий нас блок (блок водоотдачи из снега) основан на методе температурных коэффициентов и представлен в двух вариантах:

1. Вариант упрощённый и может быть выражен как:

$$M = M_f(T_a - T_{base}) \quad (6.1)$$

Где: M – величина стаявшего слоя воды [мм /день]

M_f – температурный коэффициент стаивания [мм °C⁻¹ день⁻¹]

T_{base} является пороговым параметром, который олицетворяет температуру воздуха выше которой происходит таяние снега [°C]

2. Второе уравнение имеет схожий вид, но усложнено тем, что добавлен блок интенсивности водоотдачи и принимает оно вид:

$$R_w = \begin{cases} \frac{M}{1-\varphi} + P_r \\ 0, & \sum (M + P_r) \leq \varphi(SWE + P_s) \end{cases} \quad (6.2)$$

Где: φ – параметр, характеризующий максимальную водоудерживающую способность снега

P_r – жидкие осадки[мм]

P_s – твёрдые осадки[мм]

SWE – снегозапасы (мм)[2].

В нашей ситуации было введены определённые условности и допущения:

- Мы исключаем перемерзания т.е. моделируем ситуацию, когда нет возврата к отрицательным температурам. Это необходимо т.к. в противном случае требуется изменять физические свойства подстилающей поверхности.
- Коэффициент градус-дней равен 1 мм/(°C*день)

Результаты моделирования представлены в виде таблицы в приложении 1. По данным приложения 1 были построены графики, изображённые на рисунках 6.1 – 6.4

Моделирование по опытам

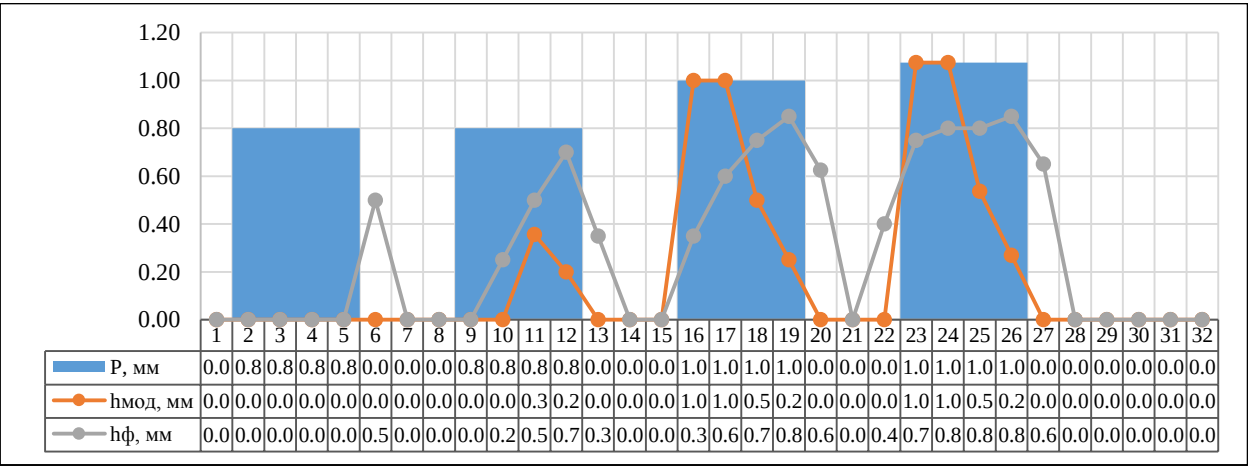


Рисунок 6.1 результаты первого эксперимента

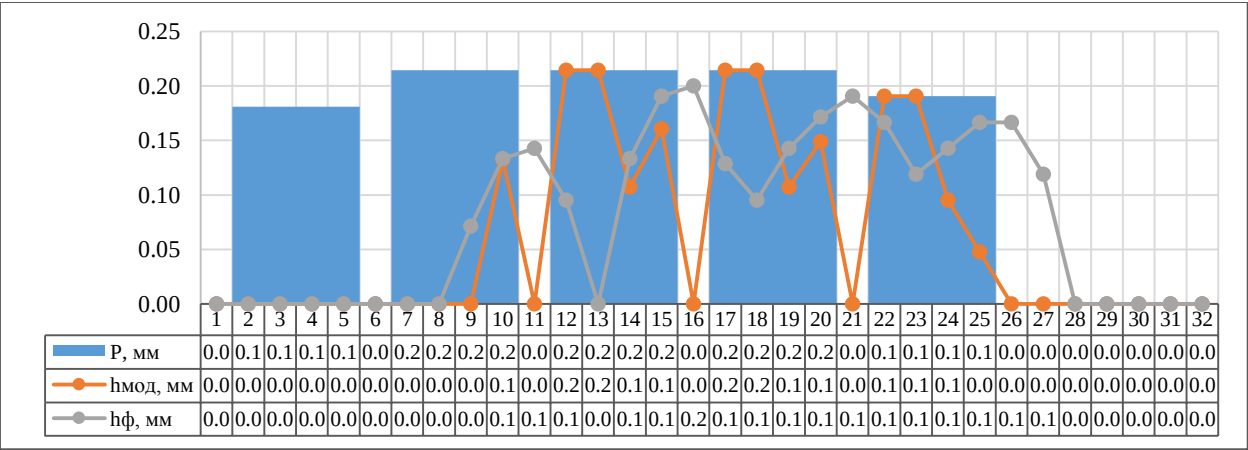


Рисунок 6.2 результаты второго эксперимента.

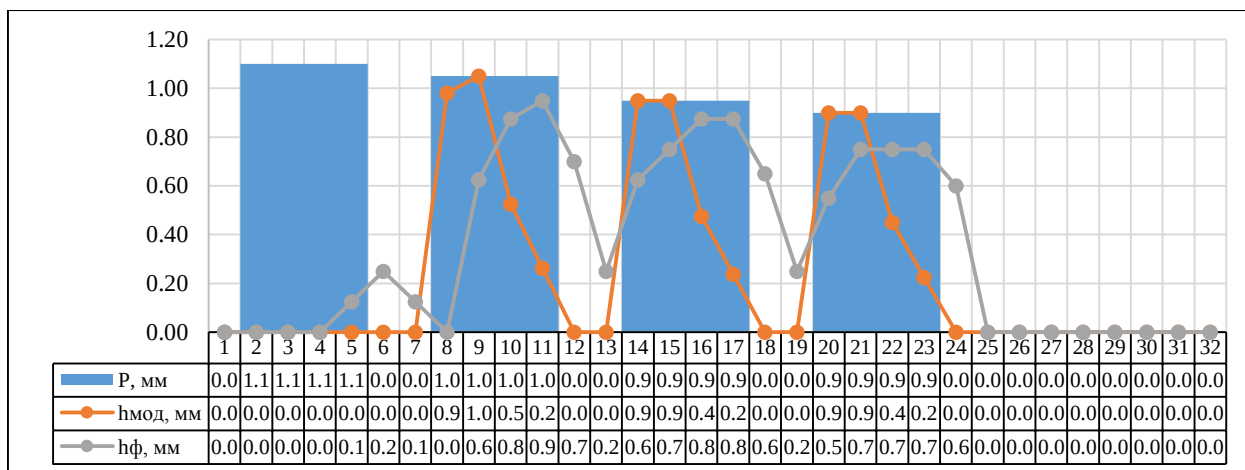


Рисунок 6.3 результаты третьего эксперимента

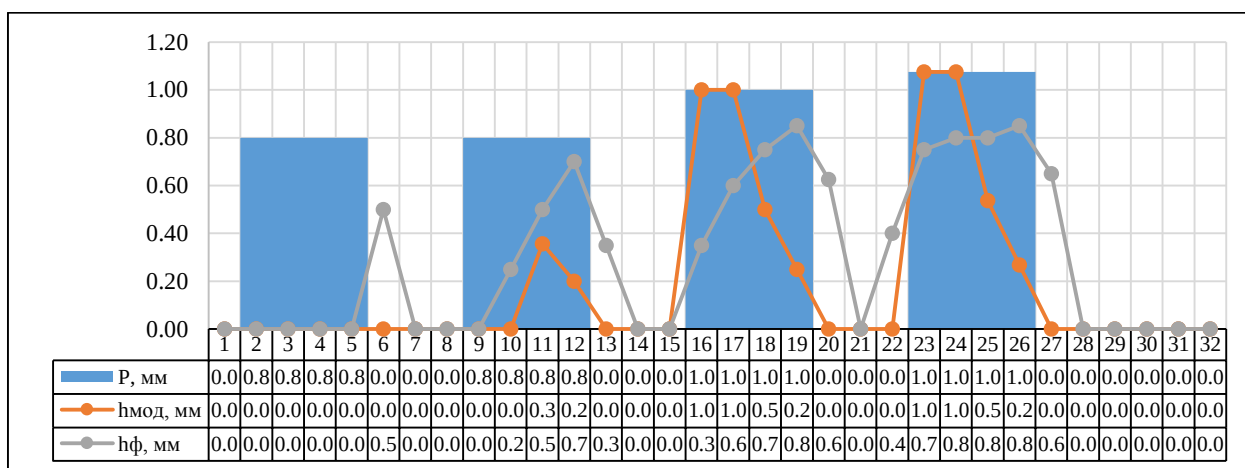


Рисунок 6.4 результаты четвёртого эксперимента

Оценка эффективности моделирования была проведена по методике ГМЦ, для чего требуется определить соотношение меры точности фактических величин (средняя квадратическая погрешность), определяемая по формуле 6.3 К квадратичному отклонению моделируемой величины. Формула 6.4

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\phi} - Y_{\text{мод}})^2}{n - m}} \quad (6.3)$$

Где: S – среднеквадратическая погрешность

Y_{ϕ} – фактический сток [мм]

$Y_{\text{мод}}$ – моделируемый сток

m – число параметров в уравнении

n – число членов ряда

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{cp})^2}{n - 1}} \quad (6.4)$$

Где: S – среднеквадратическая погрешность

Y_i – сток в момент времени i [мм]

Y_{cp} – средний сток

n – число членов ряда

Результат и расчёт удобно представить в виде таблиц. Таблица 6.1 – 6.4

№ п/п	hф, мм	hмод, мм	hs- hпр	(hs- hпр)²
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.60	0.00	0.60	0.36
6	0.60	0.00	0.60	0.36
7	0.13	0.00	0.13	0.02
8	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.78	-0.78	0.60
12	0.35	0.95	-0.60	0.36
13	0.80	0.48	0.33	0.11
14	0.90	0.24	0.66	0.44
15	0.63	0.00	0.63	0.39
16	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.00	0.00	0.00	0.00
19	0.00	0.90	-0.90	0.81
20	0.63	0.90	-0.28	0.08
21	0.90	0.45	0.45	0.20
22	0.90	0.23	0.68	0.46
23	0.73	0.00	0.73	0.53
24	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0.00	0.00	0.00	0.00
27	0.00	0.83	-0.83	0.68

28	0.58	0.83	-0.25	0.06
29	0.83	0.41	0.41	0.17
30	0.83	0.21	0.62	0.38
31	0.63	0.00	0.63	0.39
32	0.00	0.00	0.00	0.00
			Σ	6.39
			S	0.45
			σ	0.34
			s/ σ	1.33
методика не эффективная				

Таблица 6.1 Оценка эффективности моделирования водоотдачи из почвы, блоком из модели SRM. Опыт один.

№ п/п	h _ф , мм	h _{мод} , мм	h _s - h _{пп}	(h _s - h _{пп}) ²
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.07	0.00	0.07	0.01
11	0.13	0.13	0.00	0.00
12	0.14	0.00	0.14	0.02
13	0.10	0.21	-0.12	0.01
14	0.00	0.21	-0.21	0.05
15	0.13	0.11	0.03	0.00
16	0.19	0.16	0.03	0.00
17	0.20	0.00	0.20	0.04
18	0.13	0.21	-0.09	0.01
19	0.10	0.21	-0.12	0.01
20	0.14	0.11	0.04	0.00
21	0.17	0.15	0.02	0.00
22	0.19	0.00	0.19	0.04
23	0.17	0.19	-0.02	0.00
24	0.12	0.19	-0.07	0.01

25	0.14	0.10	0.05	0.00
26	0.17	0.05	0.12	0.01
27	0.17	0.00	0.17	0.03
28	0.12	0.00	0.12	0.01
29	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00
31	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0.00	0.00	0.00	0.00
			Σ	0.25
			S	0.09
			σ	0.09
			s/ σ	1.05
методика не эффективная				

Таблица 6.2 Оценка эффективности моделирования водоотдачи из почвы, блоком из модели SRM. Опыт два.

№ п/п	h _ф , мм	h _{мод} , мм	h _s - h _{пп}	(h _s - h _{пп}) ²
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.13	0.00	0.13	0.02
7	0.25	0.00	0.25	0.06
8	0.13	0.00	0.13	0.02
9	0.00	0.98	-0.98	0.96
10	0.63	1.05	-0.43	0.18
11	0.88	0.53	0.35	0.12
12	0.95	0.26	0.69	0.47
13	0.70	0.00	0.70	0.49
14	0.25	0.00	0.25	0.06
15	0.63	0.95	-0.33	0.11
16	0.75	0.95	-0.20	0.04
17	0.88	0.48	0.40	0.16
18	0.88	0.24	0.64	0.41
19	0.65	0.00	0.65	0.42
20	0.25	0.00	0.25	0.06
21	0.55	0.90	-0.35	0.12
22	0.75	0.90	-0.15	0.02

23	0.75	0.45	0.30	0.09
24	0.75	0.23	0.53	0.28
25	0.60	0.00	0.60	0.36
26	0.00	0.00	0.00	0.00
27	0.00	0.00	0.00	0.00
28	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00
31	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0.00	0.00	0.00	0.00
			Σ	4.4525
			S	0.379
			σ	0.3775
			s/ σ	1.0041
методика не эффективна				

Таблица 6.3 Оценка эффективности моделирования водоотдачи из почвы, блоком из модели SRM. Опыт три.

№ п/п	h _ф , мм	h _{мод} , мм	h _s -h _{пп}	(h _s - h _{пп}) ²
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.50	0.00	0.50	0.25
8	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.25	0.00	0.25	0.06
12	0.50	0.36	0.14	0.02
13	0.70	0.20	0.50	0.25
14	0.35	0.00	0.35	0.12
15	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.35	1.00	-0.65	0.42
18	0.60	1.00	-0.40	0.16
19	0.75	0.50	0.25	0.06
20	0.85	0.25	0.60	0.36

21	0.63	0.00	0.63	0.39
22	0.00	0.00	0.00	0.00
23	0.40	0.00	0.40	0.16
24	0.75	1.08	-0.33	0.11
25	0.80	1.08	-0.28	0.08
26	0.80	0.54	0.26	0.07
27	0.85	0.27	0.58	0.34
28	0.65	0.00	0.65	0.42
29	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00
31	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0.00	0.00	0.00	0.00
			Σ	3.2718
			S	0.3249
			σ	0.3559
			s/ σ	0.9129
методика не эффективная				

Таблица 6.4 Оценка эффективности моделирования водоотдачи из почвы, блоком из модели SRM. Опыт четыре.

По итогу можно сказать, что в таком виде физическая модель водосбора не удовлетворительно справилась с моделированием процессов влагоотдачи из снега о чём свидетельствует оценка эффективности. Во всех четырёх случаях она показала, что методика не эффективна.

7.2 моделирование влагоотдачи из почвы. Модель Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdeln (HBV)

Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdeln (HBV) Была разработана в SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) в 1976 году и имеет широкое распространение за свою простоту и надёжность. Структуру модели можно представить в виде схемы Рисунок 6.5.

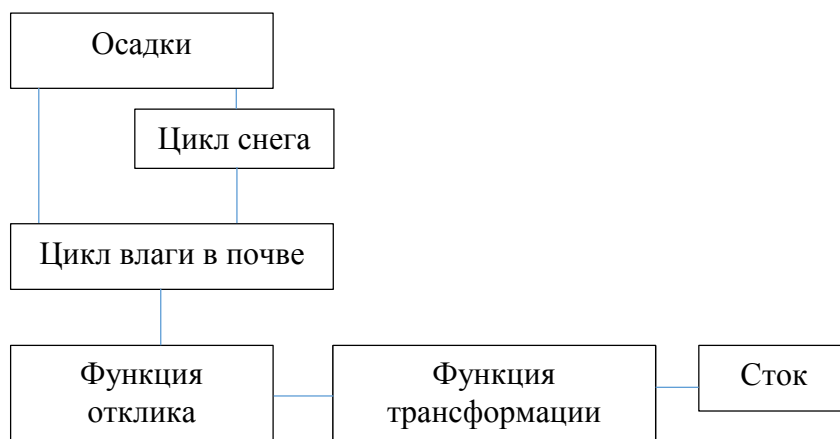


Рисунок 6.5 . Схематичное отображение структуры модели.

В данной модели можно выделить четыре блока: водоотдачи из снега, водоотдачи из почвы, функции отклика и функции трансформации. В данной работе был использован блок водоотдачи из почвы, входными параметрами в которую являются: испарение, твёрдые и жидкие осадки.[1], [2] В данной работе был использован только блок с использованием водоотдачи из почвы и в качестве входного параметра использовались жидкие осадки. Рассчёт производился по формуле 6.1

$$inf = (P) * \left(\frac{SM}{FC}\right)^{\beta} \quad (6.5)$$

Где: inf – водоотдача из почвы [мм]

P – осадки [мм]

SM – максимальная влагоудерживающая способность [мм]

FC – водность ячейки [мм]

β – нелинейный параметр, связывающий общее количество поступившей воды, запасом влаги в почве и образованием стока [2]

Моделирование для сравнения физической и математической моделей водоотдачи производилось согласно формуле 6.1. Результаты представлены в виде графиков на рисунках 7.6 – 7.9. И в таблице **XXX**

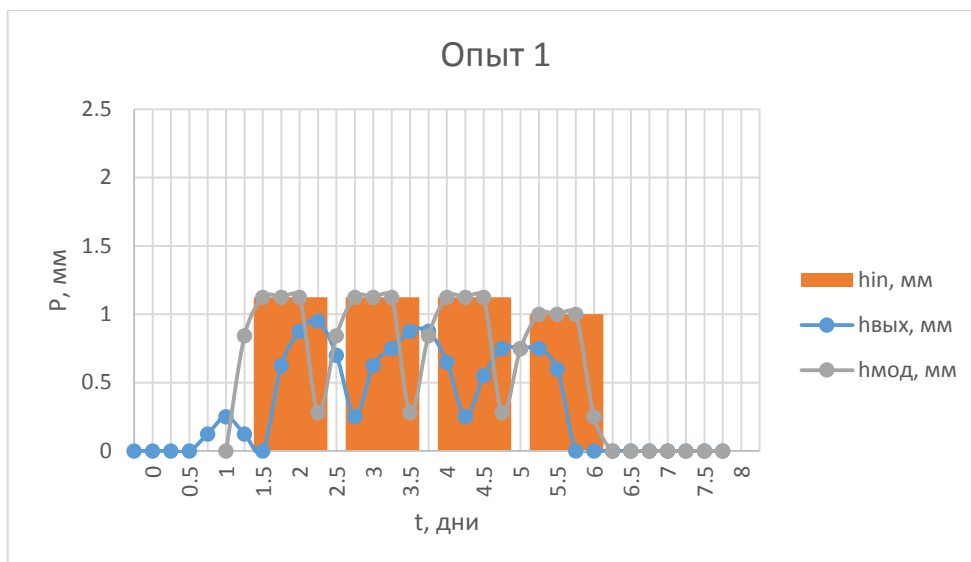


Рисунок 6.6. Результаты первого эксперимента

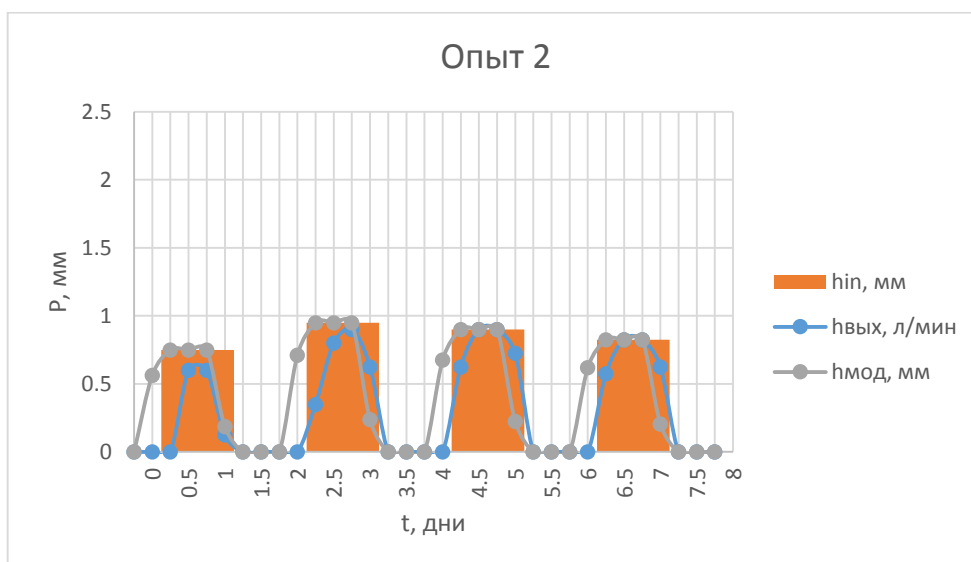


Рисунок 6.7. Результаты второго эксперимента

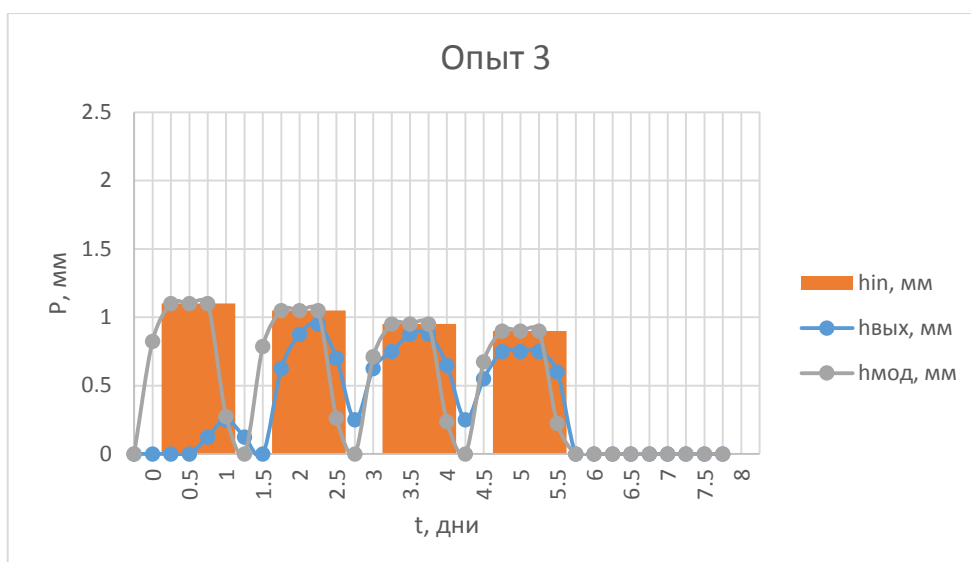


Рисунок 6.8. Результаты третьего эксперимента

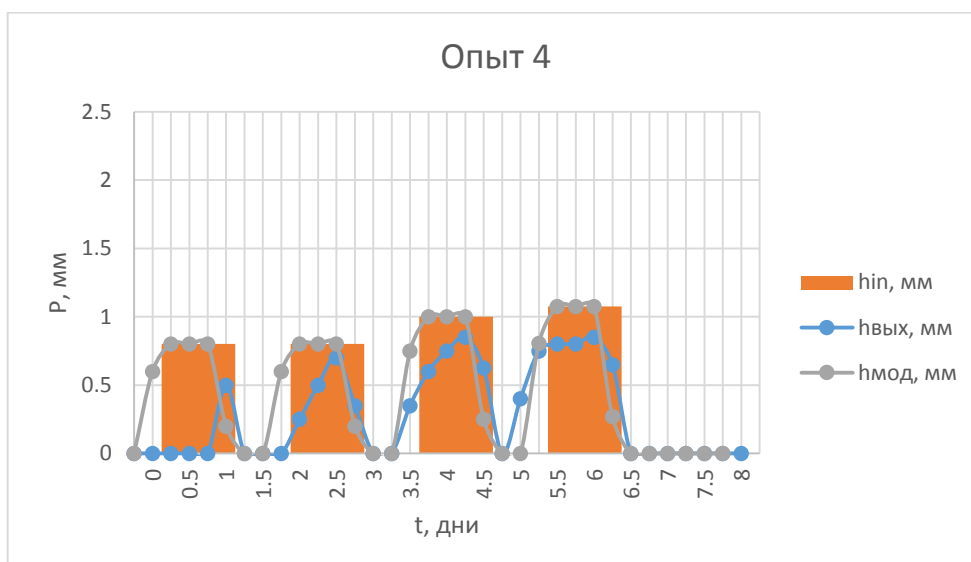


Рисунок 6.9. Результаты четвертого эксперимента.

Расчёт и результат удобно представить в виде таблиц 6.5 – 6.8

№ п/п	$h_{\text{ф}}, \text{мм}$	$h_{\text{мод}}, \text{мм}$	$h_{\text{с}} - h_{\text{пп}}$	$(h_{\text{с}} - h_{\text{пп}})^2$
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	1.13	0.00	1.13	1.27
3	1.13	0.00	1.13	1.27
4	1.13	0.75	0.38	0.14
5	1.13	1.40	-0.28	0.08

6	0.00	1.50	-1.50	2.25
7	1.13	1.00	0.13	0.02
8	1.13	0.00	1.13	1.27
9	1.13	1.40	-0.28	0.08
10	1.13	2.00	-0.88	0.77
11	0.00	2.10	-2.10	4.41
12	1.13	1.35	-0.23	0.05
13	1.13	1.00	0.13	0.02
14	1.13	1.50	-0.38	0.14
15	1.13	1.80	-0.68	0.46
16	0.00	2.00	-2.00	4.00
17	1.00	1.75	-0.75	0.56
18	1.00	1.25	-0.25	0.06
19	1.00	1.50	-0.50	0.25
20	1.00	1.75	-0.75	0.56
21	0.00	1.75	-1.75	3.06
22	0.00	1.25	-1.25	1.56
23	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0.00	0.00	0.00	0.00
27	0.00	0.00	0.00	0.00
28	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00
31	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0.00	0.00	0.00	0.00
			Σ	22.26
			S	0.85
			σ	0.81
			s/ σ	1.05
методика не эффективная				

Таблица 6.5 оценка эффективности. Опыт 1.

№ п/п	h _ф , мм	h _{мод} , мм	h _с -h _{пп}	(h _с -h _{пп}) ²
1	0.00	0.56	-0.56	0.32
2	0.00	0.75	-0.75	0.56
3	0.00	0.75	-0.75	0.56
4	1.20	0.75	0.45	0.20
5	1.20	0.19	1.01	1.03
6	0.25	0.00	0.25	0.06
7	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.71	-0.71	0.51
10	0.00	0.95	-0.95	0.90
11	0.70	0.95	-0.25	0.06
12	1.60	0.95	0.65	0.42
13	1.80	0.24	1.56	2.44
14	1.25	0.00	1.25	1.56
15	0.00	0.00	0.00	0.00
16	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.68	-0.68	0.46
18	0.00	0.90	-0.90	0.81
19	1.25	0.90	0.35	0.12
20	1.80	0.90	0.90	0.81
21	1.80	0.23	1.58	2.48
22	1.45	0.00	1.45	2.10
23	0.00	0.00	0.00	0.00
24	0.00	0.00	0.00	0.00
25	0.00	0.62	-0.62	0.38
26	0.00	0.83	-0.83	0.68
27	1.15	0.83	0.33	0.11
28	1.65	0.83	0.83	0.68
29	1.65	0.21	1.44	2.08
30	1.25	0.00	1.25	1.56
31	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0.00	0.00	0.00	0.00
			Σ	20.91
			S	0.82

			σ	0.40
			s/σ	2.08
методика не эффективная				

Таблица 6.6 оценка эффективности опыт 2

№ п/п	hф, мм	hмод, мм	hs-hпп	(hs-hпп)2
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.83	-0.83	0.68
3	0.00	1.10	-1.10	1.21
4	0.00	1.10	-1.10	1.21
5	0.25	1.10	-0.85	0.72
6	0.50	0.28	0.23	0.05
7	0.25	0.00	0.25	0.06
8	0.00	0.79	-0.79	0.62
9	1.25	1.05	0.20	0.04
10	1.75	1.05	0.70	0.49
11	1.90	1.05	0.85	0.72
12	1.40	0.26	1.14	1.29
13	0.50	0.00	0.50	0.25
14	1.25	0.71	0.54	0.29
15	1.50	0.95	0.55	0.30
16	1.75	0.95	0.80	0.64
17	1.75	0.95	0.80	0.64
18	1.30	0.24	1.06	1.13
19	0.50	0.00	0.50	0.25
20	1.10	0.68	0.43	0.18
21	1.50	0.90	0.60	0.36
22	1.50	0.90	0.60	0.36
23	1.50	0.90	0.60	0.36
24	1.20	0.23	0.98	0.95
25	0.00	0.00	0.00	0.00
26	0.00	0.00	0.00	0.00
27	0.00	0.00	0.00	0.00
28	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00

31	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0.00	0.00	0.00	0.00
			Σ	12.81
			S	0.64
			σ	0.46
			s/ σ	1.39
методика не эффективная				

Таблица 6.7 оценка эффективности опыт 3

№ п/п	h _ф , мм	h _{мод} , мм	h _с -h _{пп}	(h _с -h _{пп}) ²
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.80	0.60	0.20	0.04
3	0.80	0.80	0.00	0.00
4	0.80	0.80	0.00	0.00
5	0.80	0.80	0.00	0.00
6	0.00	0.20	-0.20	0.04
7	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.80	0.60	0.20	0.04
10	0.80	0.80	0.00	0.00
11	0.80	0.80	0.00	0.00
12	0.80	0.80	0.00	0.00
13	0.00	0.20	-0.20	0.04
14	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.00	0.00	0.00	0.00
16	1.00	0.75	0.25	0.06
17	1.00	1.00	0.00	0.00
18	1.00	1.00	0.00	0.00
19	1.00	1.00	0.00	0.00
20	0.00	0.25	-0.25	0.06
21	0.00	0.00	0.00	0.00
22	0.00	0.00	0.00	0.00
23	1.08	0.81	0.27	0.07
24	1.08	1.08	0.00	0.00
25	1.08	1.08	0.00	0.00
26	1.08	1.08	0.00	0.00

27	0.00	0.27	-0.27	0.07
28	0.00	0.00	0.00	0.00
29	0.00	0.00	0.00	0.00
30	0.00	0.00	0.00	0.00
31	0.00	0.00	0.00	0.00
32	0.00	0.00	0.00	0.00
			Σ	0.43
			S	0.12
			σ	0.43
			s/ σ	0.27
методика эффективная				

Таблица 6.8 оценка эффективности опыт 4.

ВЫВОД(КРИТИКА(РЕКОМЕНДАЦИИ))

По итогу проделанной работы мы считаем что данная модель водосбора имеет дальнейшие перспективы развития. Работа осложнена тем, что нет некой отработанной методики при моделировании формирования речного стока. Сравнение с блоками математического моделирования так же требует осторожности и внимательности. Может вызвать сомнение обоснованность выбора в качестве подстилающей поверхности паралона. В дальнейших работах вместо него предполагаем использовать иные материалы(песок, торф и д.р). Сравнение блока модели SRM и измеренного стока показало, что в таком виде на физической модели моделировать водоотдачу из снежного покрова некорректно. Хотя графики имеют схожий вид, но не проходят оценку эффективности, однако, предполагается, если провести калибровку то ситуация может измениться.

СПИСОК ИС ТОЧНИКОВ

1. Гатапова Н.Ц., Колиух А.Н., Орлова Н.В., Орлов А.Ю. ОСНОВЫ ТЕОРИИ И ТЕХНИКИ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТА
2. Георгиевский М.В. – МОДЕЛИРОВАНИЕ СНЕГОТАЯНИЯ ДЛЯ МАЛОИЗУЧЕННЫХ БАССЕЙНОВ
3. Догановский А.М. ГИДРОЛОГИЯ СУШИ (общий курс) – учебное пособие
4. Клавен А.Б., Копалиани З.Д. – ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЧНЫХ ПОТОКОВ И РУСЛОВОГО ПРОЦЕССА
5. Чугаев Р.Р. ГИДРАВЛИКА – учебное пособие – Ленинград: Энергоиздат, 1982. Стр. 520
6. Основы теории и техники физического моделирования и эксперимента Гатапова Н.Ц., Колиух А.Н., Орлова Н.В., Орлов А.Ю. Стр. 4
7. https://amperkot.ru/products/datchik_rashoda_vodyi_potoka_vodyi_yfs201_g1_2/24327385.html электронный ресурс
8. <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardUno> электронный ресурс
9. <https://alexgyver.ru/lessons/> электронный ресурс
10. https://amperkot.ru/spb/catalog/datchik_rashoda_vodyi_potoka_vodyi_yfs201_g1_2-24327385.html электронный ресурс
11. 1. HBV light version 2 User's Manual Jan Seibert November 2005 Stockholm University Department of Physical Geography and Quaternary Geology

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПРИЛОЖЕНИЕ 2