



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра инженерной гидрологии

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

(бакалаврская работа)

На тему **Сравнительный анализ оценки испарения с водной  
поверхности по различным эмпирическим формулам**

---

Исполнитель **Ахметжанов Сергей Эльвирович**

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель **К.Г. Н., доцент**

(фамилия, имя, отчество)

**Постников Александр Николаевич**

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

**К.Т.Н., доцент**

(ученая степень, ученое звание)

**Хаустов Виталий Александрович**

---

**Санкт-Петербург**

**2023**

## Содержание

Введение.....	3
1 Методы расчета испарения с поверхности воды.....	5
1.1 Метод водных испарителей.....	6
1.2 Метод водного баланса .....	33
1.3 Метод теплового баланса .....	35
1.4 Метод турбулентной диффузии .....	37
1.5 Пульсационный метод .....	38
1.6 Метод расчета по эмпирическим формулам.....	40
2 Сравнение результатов расчета по формулам различных авторов.....	44
2.1 Расчет и анализ отношений $n_{\text{д}}$ .....	44
3 Оценка испарения с поверхности водоемов в различных природных зонах по эмпирическим формулам.....	55
3.1 Краткое физико-географическое описание районов расположения водных объектов.....	56
3.2 Расчет испарения с поверхности водоемов .....	65
Заключение.....	74
Список литературы .....	76

## Введение

Испарение представляет собой процесс, в ходе которого вещество, находящееся в жидком агрегатном состоянии, либо находясь в твердом агрегатном состоянии, переходит в газообразное агрегатное состояние. Стоит отметить, что процесс перехода вещества, находящегося в твердом агрегатном состоянии в состоянии пара, достаточно нередко именуется, как возгонка. Переход в парообразное состояние воды, которая находится в структуре почвы, покрытой различными растительными объектами, именуется так называемым суммарным испарением. Такое суммарное испарение, как правило состоит из испарения, осуществляемого из почвы, а также из испарения растений, которое именуется, как транспирация. Что касается обратного процесса, а именно перехода из парообразного состояния в жидкое, то такой переход именуется как конденсация. Парообразная вода, конденсируясь в слоях атмосферы, формируют такие образования, как облака, в дальнейшем происходит формирование осадков, выпадение которых осуществляется на землю. Именно за счет указанных выше процессов, которые протекают в атмосфере, имеет место круговорот воды в биосфере, который осуществляется непрерывным образом.

Процесс испарения, осуществляемого с тех или иных поверхностей, представляет собой предмет интереса исследователей в различных научных направлениях. К примеру, особо данные процессы, имеют значение, при осуществлении практического решения тех или иных задач народнохозяйственного сектора, находящихся в тесной взаимосвязи с применением разнообразных водных ресурсов нашего государства.

Испарение зависит от температуры воды, влажности и температуры воздуха, скорости ветра, атмосферного давления, минерализации воды, наличия и типа растительности на водоемах.

Многие вопросы, связанные с таким процессом как испарение, с древних времен вызывали широкий интерес у ученых. Исследованиями

экспериментального характера, ориентированными на изучение основных аспектов рассматриваемого процесса, особенно это касается процессов испарения с водной поверхности, ученые занялись примерно с XVII века. Достаточно важным событием, в становлении теоретической концепции о испарении, стало возникновение трудов исследователя английского происхождения Дж. Дальтона,<sup>(1)</sup> а также исследователя, трудившегося на территории нашего государства Э. В. Штеллинга, опубликованные соответственно в 1802 и в 1882 гг. Именно Дальтон один из самых первых сформировал так называемый количественный закон, который отражал зависимость такого показателя, как скорость испарения от давления насыщенного пара парциального давления пара в воздухе, окружающем испаряющую жидкость. Достаточно стремительные темпы роста количества исследований рассматриваемого процесса с тех или иных поверхностей, получили в первой половине прошлого века.

Непосредственное измерение рассматриваемого процесса с различных больших площадей поверхности, которая является водной, в природных условиях, на сегодняшний день, не представляется возможным реализовать. На данный момент, в целях проведения оценивания рассматриваемого процесса, применяются различные косвенные методы, которые базируются на использовании уравнений водного и теплового балансов, или турбулентной диффузии водяного пара в атмосфере. Кроме того, достаточно популярными являются методы расчета испарения, основанные на методах эмпирического, а также полуэмпирического характера, которые базируются на применении сведений гидрометеорологического типа, являющимся общедоступными.

## 1. Методы расчета испарения с поверхности воды

Процесс исторического развития исследований, направленных на изучение такого процесса, как испарение с водной поверхности, являющейся открытой, является достаточно продолжительным. Достаточно известным фактом является то, что ряд несложных исследований, реализованных астрономом английского происхождения Галлеем, предоставили ему возможность осуществить расчет, а также привести доказательство того, что вся вода, которая испаряется с поверхности водных объектов, возвращается обратно на поверхность земли в форме различных осадков в том объеме, который является достаточным, чтобы обеспечить сохранность речного стока.

Особо высокую степень важности стоит отметить у ряда работ Г.В. Рихмана, особенно их значение высоко в контексте становления такой науки, как теплофизика, а также в контексте исследования процессов испарения. Ученый, вследствие организации и реализации широкого спектра различных практических опытов определил, что процесс испарения находится в тесной зависимости от разности упругостей холодного и теплого воздуха, от влажности и скорости его движения, от размера испаряющей поверхности, от массы и глубины воды в сосуде. Кроме того, исследователь указал на то, что процесс испарения как правило сопровождается снижением показателя температуры.

После того, как Д. Дальтон в 1802 году разработал единую теорию упругости водяного пара, сформировалась достаточно прочная база, на основе которой можно было установить испарение с водной поверхности, имеющей место в природе. Ученый посредством ряда экспериментов определил, что скорость испарения находится в пропорциональной зависимости от разности упругости насыщенного водяного пара и фактической упругости водяных паров в воздухе.

Говоря об оценивании процесса испарения, то оно может быть реализовано за счет применения целого спектра различных методов. Широкий

спектр различных методов обусловлен тем, что достаточно непростой механизм взаимодействия между поверхностью водного объекта, а также воздушной массой, которая прилегает к этой поверхности, является не раскрытым в полной мере. Стоит отметить, что достаточно точным и эффективным методом в данном вопросе является инструментальный, или иными словами прямой метод, под которым следует понимать осуществление прямого измерения слоя испарившейся воды посредством специальных испарителей водного типа. Также стоит отметить, что к прямому методу, следует причислить пульсационный метод. Но стоит отметить, что они не во всех случаях могут быть использованы по причине их трудоемкости, а также отсутствия возможности их применения в процессе формирования проекта. По этой причине, с целью установления испарения с водной поверхности, используют методы, которые относятся к категории косвенных. Такие методы, базируются исключительно на применении ряда уравнений водного, а также теплового балансов, турбулентной диффузии водяного пара в атмосфере. Кроме того, сформирован ряд формул эмпирического типа, предназначенных для осуществления расчета испарения по сведениям метеорологической природы, которые достаточно широко используется в практической деятельности в сфере гидрологии. Проведем анализ данного спектра методов.

## **1.1 Метод водных испарителей**

### **1.1.1 Наблюдения за испарением с водной поверхности**

Сеть водноиспарительных площадок страны является частью специализированной гидрометеорологической сети станций и предназначена для производства наблюдений за испарением с открытой водной поверхности.

Наблюдения на сети водноиспарительных площадок имеют целью получение режимных данных по испарению, необходимых для климатологических обобщений, усовершенствования и оценки методов

наблюдений и расчета испарений, а также для обслуживания различных отраслей народного хозяйства сведениями о потерях воды на испарение с открытой водной поверхности прудов, озер и водохранилищ.

Сеть водноиспарительных площадок подразделяется на фоновую, базовую и региональную. Одна и та же водноиспарительная площадка может принадлежать к нескольким из перечисленных выше категориям сетей.

Фоновая водноиспарительная сеть — это более массовая сеть, предназначенная для получения данных по испарению с открытой водной поверхности на территории страны. Она включает в себя водноиспарительные площадки, расположенные на суше и оборудованные стандартными сетевыми испаромерами. Размещение таких площадок по территории страны производится на основе определения временного интервала с учетом ошибки интерполяции (экстраполяции) сумм испарения за этот интервал времени. Проекты размещения водноиспарительных площадок фоновой сети периодически разрабатываются Государственным гидрологическим институтом (ГГИ). Задачей региональных и территориальных УГКС является выбор и уточнение их конкретного местоположения, а также установка оборудования и организация наблюдений в соответствии с требованиями, изложенными в Наставлении.

Базовая водноиспарительная сеть предназначена для измерения испарения с водной поверхности и изучения его режима в наиболее типичных природно-климатических зонах страны, а также для оценки однородности показаний стандартных сетевых испаромеров.

Региональная водноиспарительная сеть имеет своей задачей наблюдения за испарением с открытой водной поверхности и получение оперативных и режимных данных по этому элементу водного баланса для отдельных водоемов.

Планы развития базовой и региональной водноиспарительной сети разрабатываются УГКС и согласовываются с ГГИ.

Получение сравнимых данных на фоновой, базовой и региональной

водноиспарительной сети обеспечивается применением однотипных приборов и оборудования, единых правил производства наблюдений и обработки результатов измерений, а также систематическими поверками измерительных приборов и оборудования.

Стандартным сетевым оборудованием для наблюдений за испарением с водной поверхности на фоновой, базовой и региональной водноиспарительной сети служит испаромер ГТИ-3000, в комплект которого входят собственно испаритель, дождемер и измерительные средства (объемная бюретка, измерительная трубка, дождемерный стакан).

Эталонным оборудованием на водноиспарительной сети служит испарительный бассейн площадью 20 м<sup>2</sup>, глубиной 2 м.

### 1.1.2 Классификация водноиспарительных площадок

В настоящее время выделяется несколько водноиспарительных площадок. В зависимости от того, каким является состав оборудования, количество работ, а также программа наблюдений, выделяют площадки I, II и III типа, а также плавучие испарительные установки.



Рис 1.1 - Водноиспарительная площадка II типа

Водноиспарительные площадки III типа, как правило оборудуются стандартным испаромером сетевого характера.



В основном, они применяются на различных станциях, занимающихся метеорологической деятельностью, а также являются структурными элементами последних.

Данный тип площадок, является структурной составляющей фоновой водноиспарительной сети.

Что касается водноиспарительных площадок II типа, то они в комплексе с сетевым испаромером, в обязательном порядке должны быть оборудованы специальным испарительным бассейном, площадь которого должна составлять 20 м<sup>2</sup>.

Как правило, данный тип площадок, формируется на станциях метеорологического, гидрологического, а также воднобалансового характера. Такого характера площадки формируют базу основной сети.

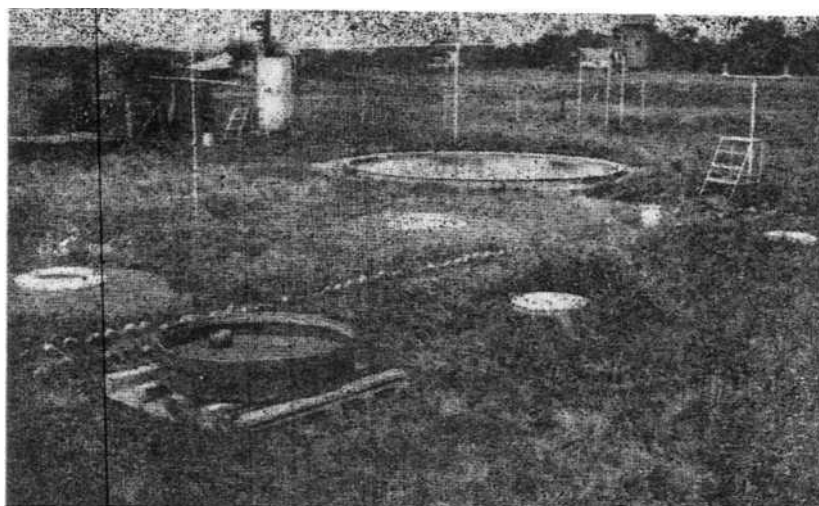


Рис 1.2 — Водноиспарительная площадка II типа

Говоря о плавучих установках испарительного типа, то они определяют в качестве основной задачи которых выступает осуществление наблюдения за испарением, происходящим с поверхности воды, на тех или иных водоемах. Отметим, что такие установки базируются на использовании стандартного сетевого испаромера, который как правило располагается на отдельном специально оборудованном плоту, находящемся на водной поверхности.

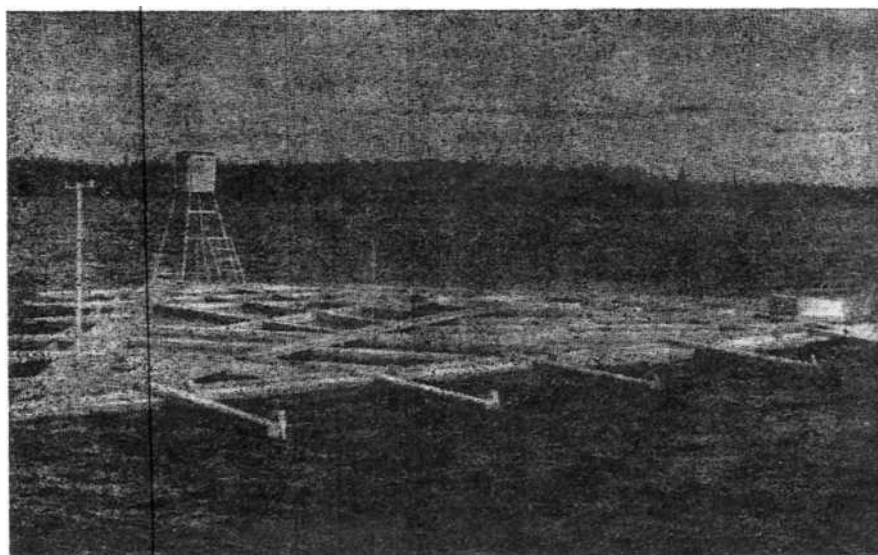


Рис 1.3 — Плавающая испарительная установка (большой плот)

Отметим, что плавучие испарительные установки являются структурными элементами региональной сети водноиспарительного характера. Они могут быть установлены, исключительно в тех случаях, когда имеет место водноиспарительная площадка III, либо II типа, которые находятся в пределах суши, либо с одновременной организацией той или иной площадки.

Структура основных приборов, а также оборудования, программа и ряд правил наблюдений в пределах рассматриваемых площадок водноиспарительного характера, а также в пределах плавучих установок испарительного типа, обязаны в полной мере соответствовать тем требованиям, которые отражены в рамках Наставления.

Водноиспарительные площадки I типа — это площадки для измерения испарения с поверхности парового поля и суммарного испарения с естественного разнотравья. Они оборудованы почвенными испарителями ГГИ-500-50, почвенными дождемерами и водосборными сосудами. Водноиспарительные площадки I типа используются в зонах избыточного и достаточного увлажнения, при глубине залегания грунтовых вод более 2 м<sup>3</sup>. Наблюдения на водноиспарительных площадках I типа проводятся с помощью почвенных испарителей ГГИ-500-50, которые заполняются почвенными

монолитами с естественным разнотравьем. Испарители взвешиваются через каждые 5 суток, а также измеряются осадки по почвенному дождемеру и просачивание воды через почвенный монолит. Наблюдения проводятся с 26 апреля по 26 октября. Результаты наблюдений обрабатываются и оформляются в соответствии с правилами.

### 1.1.3 Перечень приборов и оборудования

Водноиспарительные площадки II и III типа и плавучие испарительные установки для повседневной работы должны иметь набор приборов, оборудования и вспомогательных средств, приведенный в таблице 1.

Таблица 1.1 – Список приборов и оборудования, необходимых для производства наблюдений на водноиспарительных площадках и плавучих испарительных установках

Приборы, оборудование и вспомогательные средства	Водноиспарительная площадка		
	II тип	III тип	Плавучая установка
Испарительный бассейн площадью 20 м <sup>2</sup> , глубиной 2 м	1	-	-
Испаромер ГГИ - 3000	1	1	1
В комплект испаромера входят: - испаритель площадью 3000 см <sup>2</sup>	1	1	1
- объемная бюретка	1	1	1
- измерительные	4	4	4

трубки			
- дождемер площадью 3000 см <sup>2</sup>	1	1	1
- дождемерные ведра	2	2	2
- дождемерный стакан	2	2	2
- болты с гайками и прокладками- шайбами	8	8	8
- описание и инструкция по применению	1	1	1
- свидетельство о поверке измерительных трубок	1	1	1
Водный термометр на поплавке	2	2	2
Анемометр (ручной или электроконтактный)*	3	3	3
Стойка для анемометров	1	1	1
Стойка для сличения анемометров	1	1	-
Резиновая груша объемом 200-300 см <sup>2</sup>	1	1	1
Сачок с частой сеткой из металлической	1	1	1

проволоки или синтетических материалов			
Доливной бак	1	-	-
Плот стандартного образца для установки приборов и вспомогательного оборудования	-	-	1
Буй промежуточный для плота	-	-	1
Якорь для плота	-	-	1
Лодка, оборудованная в соответствии с правилами по технике безопасности	-	-	1
Лебедка типа «Нева»	-	-	1
Часы	1	1	1
Фонарь	1	1	1
Пирс для плота	-	-	1
Водный термометр в оправе	-	-	1
Аспирационный психрометр большой модели	-	-	1
Станционный психрометр	-	-	1
Будка психометрическая	-	-	1

Гидрограф	-	-	1
Запасные приборы: Анемометр ручной	2	2	2
Стакан дождемерный	1	1	1
Термометр от аспирационного психрометра большой модели	2	2	2
Станционный психрометр	1	1	1
Белый диск прозрачномер	1	-	1

\* Предпочтение следует отдать электроконтактным анемометрам М-92.

Все приборы, по которым производятся наблюдения, должны быть предварительно испытаны и иметь поверочное свидетельство, номер и клеймо поверки.

Для записи результатов измерений на водноиспарительной площадке и их последующей обработки станция должна иметь следующие специальные пособия и бланковые материалы:

- настоящий выпуск Наставления;
- наставление гидрометеорологическим станциям и постам, вып. 3, ч. I;
- психрометрические таблицы;
- книжки для записи наблюдений (КГ-46);
- месячные таблицы (ТГ-46);
- журнал приема и сдачи дежурств.

#### 1.1.4 Описание оборудования и измерительных средств

Испарительный бассейн и все приспособления к нему изготавливаются в соответствии с рабочими чертежами, разработанными ГГИ, которые высылаются по запросам УГКС.

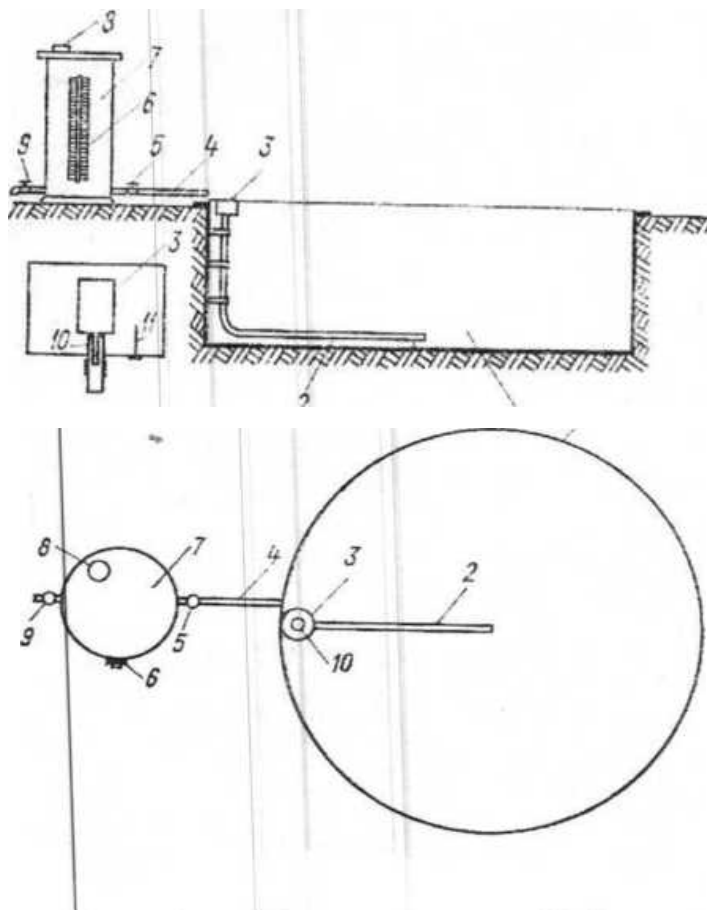


Рис 1.4 — Испарительный бассейн

Эталонный испарительный бассейн, представленный на рисунке 4 – это цилиндрический бак (1), который обладает плоским дном. Такое дно представляет собой сваренные железные листы, толщина которых составляет 4-5 мм. С той целью, чтобы стенки бака, а также его дно имели определенную степень жесткости, к ним осуществляем приваривание каркаса, который состоит из железа уголкового характера. Площадь бассейна 20 м<sup>2</sup>, глубина 2 м. В структуру бассейна входит также реперная трубка (10) с успокоителем (3), а также специальный доливной бак (7).

Реперная трубка — это трубка, которая используется для измерения уровня жидкости в каком-либо сосуде. Например, в испаромере ГГИ-3000

реперная трубка располагается в центре сосуда, наполненного водой, и заканчивается реперной иглой, на которую надевается объемная бюретка. По разности объемов воды, взятых бюреткой в два последовательных срока наблюдений, определяют количество испарившейся воды. Успокоитель (3) обеспечивает некоторую защиту от прямого влияния, оказываемого волнами, а также ветра. В составе успокоителя содержится специальный стерженек (11), на окончании которого имеется иглообразно острое, который выступает в качестве указателя высоты, на уровне которой обязан находиться уровень воды в бассейне.

Доливной бак (7) служит для периодического доливания воды в испарительный бассейн. Он изготавливается из 2-миллиметрового листового железа и имеет следующие размеры: площадь поперечного сечения 0,40 м<sup>2</sup>, высота 1,65 мм и объем 0,66 м<sup>3</sup>. Для наполнения бака водой в верхней его части имеется отверстие, закрываемое крышкой (8).

Нижняя часть доливного бака соединена с испарительным бассейном металлической трубой (4) диаметром 25-30 мм. Труба, по которой вода доливается в бассейн оборудуется герметически закрывающимся краном (5), который располагается около доливного бака. С противоположной стороны бака в нижней его части устанавливается второй аварийный кран (9).

Для измерения количества воды, доливаемой в испарительный бассейн, на доливном баке устанавливается водомерное стекло (6) с сантиметровыми и полусантиметровыми делениями. При соотношении площадей доливного бака (0,40 м<sup>2</sup>) и испарительного бассейна (20 м<sup>2</sup>), равном 1:50, одно сантиметровое деление на водомерном стекле доливного бака соответствует 0,2 мм слоя воды в испарительном бассейне.

К испарительному бассейну и всем приспособлениям к нему предъявляются следующие требования:

- диаметр бассейна, найденный как среднее арифметическое из четырех измерений, сделанных через 45° с погрешностью до 1 мм, должен быть равен 5040 мм (с отклонениями не более ±30 мм);



- бассейн и доливной бак не должны иметь течи;
- реперная трубка должна иметь ровный горизонтальный верхний срез, а отверстие для установки объемной бюретки должно иметь строго вертикальное направление и соответствовать диаметру установочного стержня бюретки;
- расстояние от верхнего края успокоителя до среза реперной трубки должно быть равно 125 мм, а до острия иглы - 100 мм;
- борт успокоителя должен быть на одном уровне с бортом бассейна;
- стержень с иглой должен быть хорошо вылужен и укреплен вертикально;
- по всей высоте доливного бака должен быть выдержан диаметр, равный 714 мм;
- кран, установленный на трубе, которая соединяет доливной бак с испарительным бассейном, в закрытом положении совершенно не должен пропускать воду;
- соединительная труба успокоителя должна идти строго вертикально вдоль стенки бассейна, а в нижнем колене у дна - располагаться на высоте 15-20 см над дном.

Испарительный бассейн и доливной бак перед установкой на место проверяются и испытываются на течь в соответствии с п. 3.5 Наставления.

Испаромер ГГИ-3000 — это прибор для измерения и регистрации испарения с почвы и водной поверхности, а также количества выпавших осадков. Испаромер состоит из двух металлических сосудов площадью поперечного сечения 300 см<sup>2</sup>, цилиндрической формы, с конусообразным дном. В центре одного из сосудов, наполненного водой, располагается реперная трубка, заканчивающаяся реперной иглой, на которую надевается объемная бюретка. По разности объемов воды, взятых бюреткой в два последовательных срока наблюдений, определяют количество испарившейся воды. Во втором сосуде располагается дождемерное ведро для того, чтобы исключить расчетным путем попавшие в испаритель осадки.

Испаритель (рис. 5) – это бак цилиндрической формы (1), дно которого представляет собой конус. Этот бак выполнен из железных листов, с нанесённым на них оцинкованным покрытием. В центре бака, находится реперная трубка (3), выполненная из металла, на которую в процессе измерения воды, размещают указанную выше объемную бюретку. С целью определения уровня воды, находящейся в испарителе, имеется приспособление, а именно специальная игла (5), которая закрепляется на реперной трубке. Острие данной иглы, должно быть установлено на 75 мм ниже от верхнего края испарителя. Отметим, что с целью установки испарителя на плоту, в верхней наружной части окружности испарителя, имеются четыре ушка (60, выполненные из железа уголкового типа).

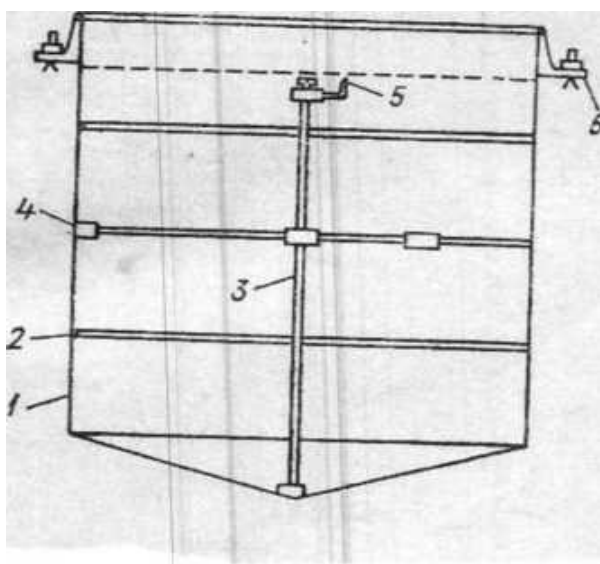


Рис 1.5 — Испаритель

Отметим, что показатель, который отражает площадь поперечного сечения испарителя, составляет  $3000 \text{ см}^2$ . С целью предохранения стенок испарителя от различных изменений деформационного характера, внутри данного оборудования имеются специальные кольца (2), выполняющие распорную функцию, а также прутки-спицы (4). Что касается верхнего края испарителя, то он закатан в круглый фальц.

**Объемная бюретка и измерительные трубки (рис. 6) необходима в**

целях осуществления измерений высоты водного уровня внутри испарителя, а также внутри испарительного бассейна. Бюретка, исходя из своего внешнего вида – это стакан цилиндрической формы (1), высота которого составляет 60 мм, при этом площадь сечения составляет 20 см<sup>2</sup>. Отметим, что ко дну бюретки, которое является плоским, с наружной стороны прикреплен специальный стержень (11), основная функция которого заключается в фиксации бюретки на реперной трубке, которая была рассмотрена нами выше. Что касается верхней части бюретки, то она на ½ часть перекрыта специальной крышкой, к которой посредством припайки присоединена специальная дужка (5).

Далее стоит указать на то, что в нижней части боковой стенки бюретки находится специальное отверстие (10), закрытие которого осуществляется посредством резиновой пробки (9), находящейся на конце Г-образного рычага (8). За счет оси (7), которое продевается через ушко (6), указанный рычаг, является подвижным. Вращение винта (4), позволяет осуществлять как открытие, так и закрытие отверстия в бюретке. У верхнего края бюретки со стороны полукрышки имеется сливной носик-трубка (2), через которую (при закрытом нижнем отверстии) переливают воду из бюретки в измерительную трубку. Все части бюретки имеют гладкую поверхность и никелированы.

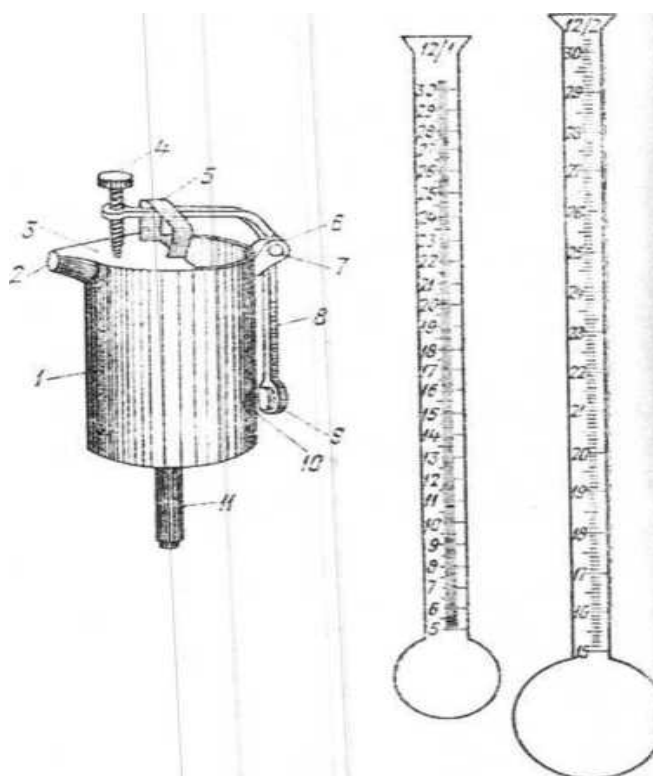


Рис 1.6 — Объемная бюретка с измерительными трубками

Основная функция измерительной трубки заключается в осуществлении измерения объема воды, который собирается посредством бюретки либо из бассейна, либо из испарителя. Отметим, что в стандартный комплект, как правило, входят два набора трубок, относящихся к категории измерительных. В структуру первого набора входят трубки №1 и 2, а второй, который является запасным, состоит из трубок №3 и 4. Хранение трубок осуществляется в футляре, выполненном из металла.

*Дождемер* (рис. 7) – это бак цилиндрического характера (1), дно которого представлено в форме конуса. В верхнюю часть данного бака помещается воронка (4), при этом показатель, который отражает площадь отверстия, являющегося приемным, составляет  $3000 \text{ см}^2$ . Верхний край, указанной воронки, характеризуется наличием металлического козырька (5), посредством которого обеспечивается удерживание воронки на стенках бака. Посредством трубки (2), происходит стекание осадков в специальное ведро (9), которое помещается на специальную крестовину, которая припаивается ко дну

баку (11). Фиксация указанного ведра осуществляется внутри кожуха (10), который также припаян ко дну бака. Ведро, объем которого составляет 15 л, может принять в себя 50 мм слоя осадков, а также обладает откидной ручкой (3).

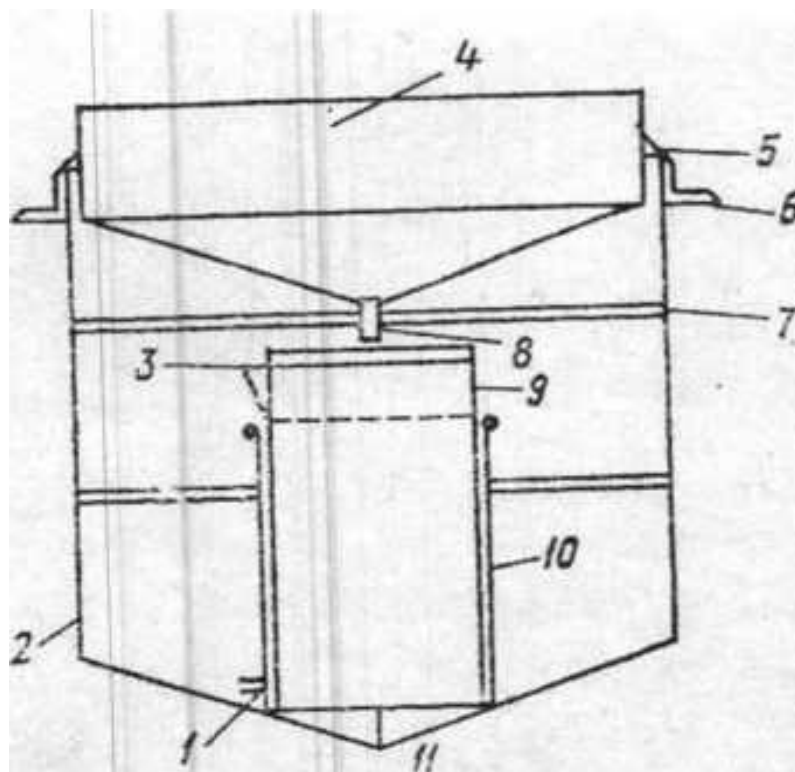


Рис 1.7 — Дождемер

**Дождемерный стакан** представляет собой устройство, которое необходимо для осуществления необходимого измерения объема осадков, которые попали в специальное, указанное выше ведро, а также объема воды, которая доливается в испаритель, либо напротив отливается из него. Отметим, что градуированная часть данного стакана характеризуется наличием стаделений, каждое при этом соответствует  $5 \text{ см}^3$ .

**Водный термометр на поплавке** (рис. 8) представляет собой приспособление, необходимое для осуществления необходимых измерений температуры воды в поверхностном слое (на глубине 0,01 м) в испарителе, испарительном бассейне и водоеме. Он представляет собой ртутный термометр от аспирационного психрометра большой модели с делениями

через  $0,2^{\circ}\text{C}$  (ТМ-6), укрепленный на специальном поплавке.

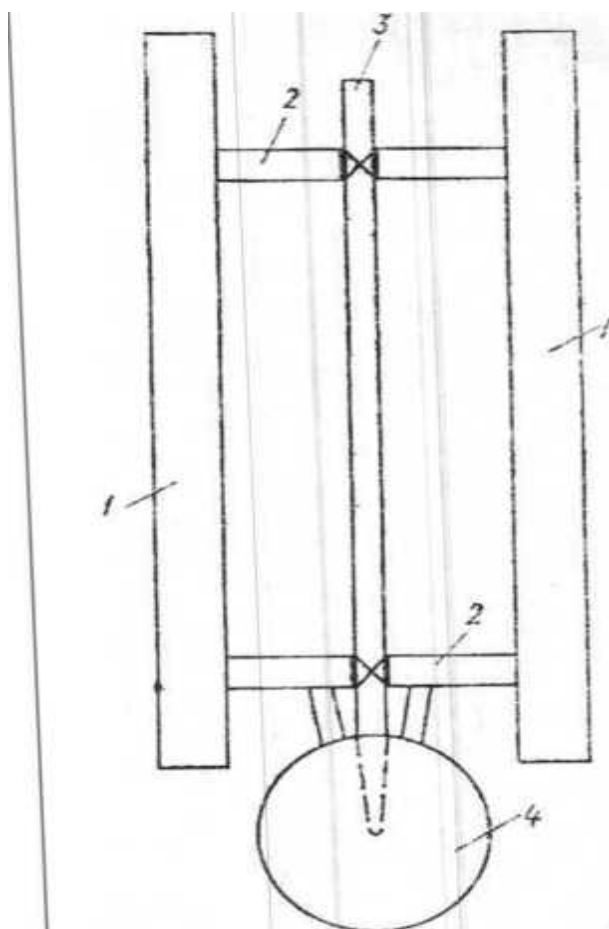


Рис 1.8 — Водный термометр на поплавке

Поплавок состоит из двух пустотелых металлических трубок (1) диаметром 2,0 см и длиной 25 см, скрепленных параллельно на расстоянии 10-12 см друг от друга поперечными металлическими полосами (2), к которым посередине прикрепляется термометр (3). На одной из поперечных полос на высоте 3-5 см прикреплен металлический экран (4) диаметром 7 см, защищающий ртутный резервуар термометра от попадания на него прямой солнечной радиации. Поплавок изготавливается из тонкой жести или цветного металла и окрашивается белой масляной краской. Масса поплавка с термометром и положение поперечных полосок подбираются таким образом, чтобы центр ртутного резервуара термометра был погружен в воду на 1 см.

Отметим, что водный термометр представляет собой устройство,

основная функция которого заключается в осуществлении измерения температуры воды в водоеме на глубине 10 см. Такой тип термометра, представляет собой ртутный термометр от стационарного психрометра, с делениями через  $0,2^{\circ}\text{C}$  (ТМ-4), заключенный в оправу (ОТ-51).

Анемометр ручной чашечный (МС-13) — это прибор для измерения средней скорости воздушного потока или ветра в различных условиях. Он состоит из четырехчашечной вертушки, которая вращается под действием потока, и счетного механизма, который показывает количество оборотов вертушки за определенное время. Некоторые технические характеристики анемометра МС-13, следующие: диапазон измерения скорости воздушного потока от 1 до 20 м/с; чувствительность не более 0,8 м/с; основная погрешность не более  $\pm(0,3 + 0,05V)$  м/с, где  $V$  - измеряемая скорость; время измерения 170 с; габаритные размеры 170x70x70 мм; масса 0,25 кг.

Для того, чтобы пользоваться анемометром МС-13, вам нужно выполнить следующие шаги: перед измерением скорости воздушного потока или ветра записать показания по трем шкалам анемометра (единиц, сотен, тысяч); установить анемометр вертикально в измеряемом потоке и через 10-15 с одновременно включить арретиром механизм анемометра и секундомер; экспонировать анемометр в потоке в течение одной или двух минут; по истечении времени экспозиции выключить механизм и секундомер и записать показания по шкалам анемометра и время экспозиции в секундах; разность между конечным и начальным отсчетом поделить на время экспозиции и определить число делений шкалы, приходящихся на одну секунду; скорость воздушного потока или ветра определить по градуировочному графику, приложенному к анемометру.

Поскольку продолжительность безотказной работы ручных анемометров мала, они должны подвергаться сличению с контрольным анемометром. Указанное сличение должно производиться на водноиспарительной площадке ежемесячно согласно указаниям, изложенным в Наставлении.

Стойка для установки анемометров должна обеспечивать устойчивое

положение анемометра и удобство эксплуатации. Стойка может быть изготовлена из деревянного бруса или из металлической трубы сечением 45-60 мм. Стойка (рис. 9) состоит из вертикально установленной подставки (1), на которой сверху закреплена поворотная перекладина (2) длиной 100 см. Высота подставки вместе с перекладиной подбирается и устанавливается таким образом, чтобы центры полушарий анемометров находились на высоте 200 см над поверхностью земли на площадке или воды в водоеме. Стойка окрашивается белой масляной краской.

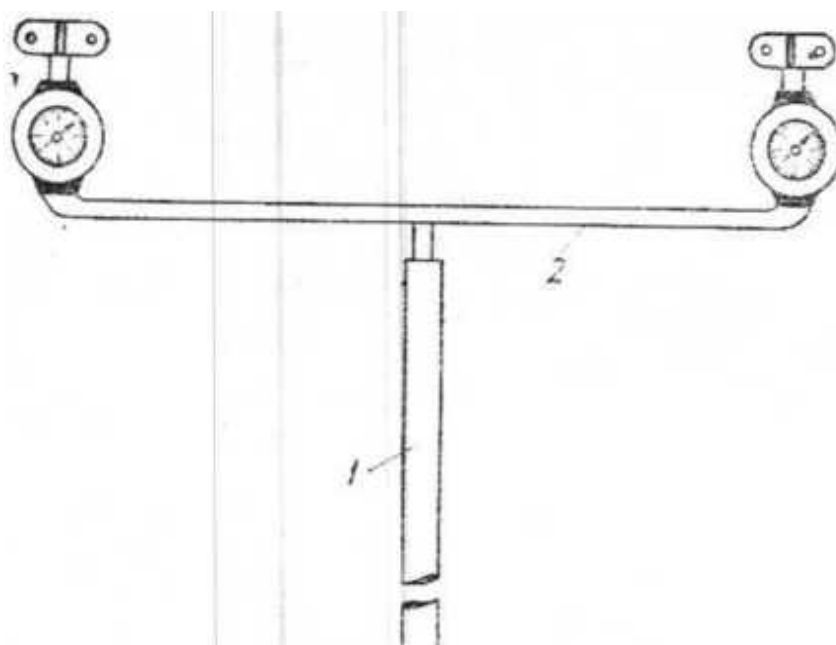


Рис 1.9 — Эскиз стойки для анемометров

**Плот стандартного размера** (рис. 10) имеет форму равностороннего треугольника со сторонами равными 12 м. Остов плота выполняется из деревянных брусьев сечения 20х20 см, жестко скрепленных между собой при помощи болтов, металлических скоб и угольников. Плот разделен на отсеки, подшит досками сечением 5<sup>^</sup>10 см, между которыми оставлены щели в 5 см, допускающие свободное проникновение воды. В вершинах плота имеются специальные гнезда, в которых размещаются металлические поплавки. Гнезда в кормовой части плота служат для размещения стандартного сетевого



испаромера ГГИ-3000. Предусмотрено размещение на плоту двух испарителей площадью 3000 см<sup>2</sup> и одного дождемера такой же площади.

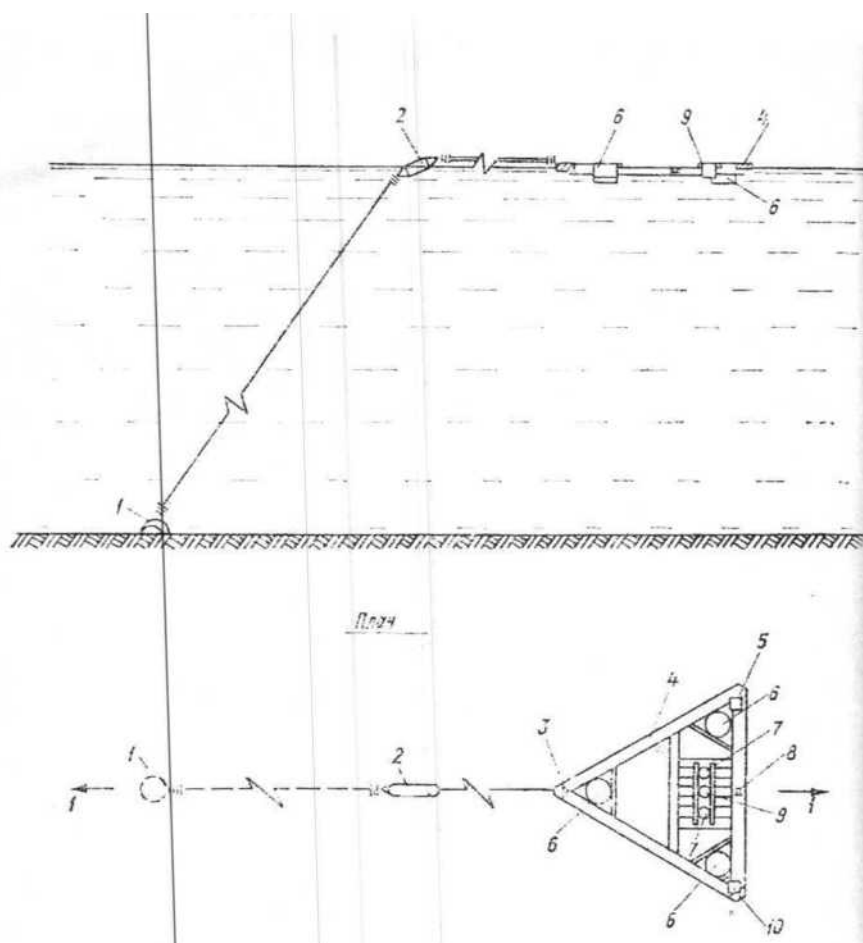


Рисунок 1.10 – Схема стандартного плота для плавучей испарительной установки: 1 – якорь, 2 – буй амортизационный, 3 – стойка для анемометров, 4 – плот деревянный, 5 – будка для самописцев, 6 – поплавок, 7 – испаритель, 8 – лебедка, 9 – дождемер, 10 – будка психрометрическая

Плот за одну вершину (нос) закрепляется к якорю через промежуточный буй, что обеспечивает постоянную ориентировку плота по ветру и ослабляет динамическое воздействие волновых нагрузок.

Стойка для анемометров устанавливается в носовой части плота. Метеорологическая будка для стационарного психрометра (или стойка для аспирационного психрометра) размещается в кормовой части плота на правом его углу. Будка для термографа и гигрографа размещается тоже в кормовой

части на левом углу. В центре кормовой части плота размещается гидрометрическая лебедка типа ПИ-23 (ГЛН-52).

**Большой плот** монтируется из нескольких (два и более) плотов стандартного размера и может иметь форму правильного треугольника или ромба. На большом плоту, собранном из трех стандартных плотов, могут быть дополнительно размещены эталонный испарительный бассейн площадью 20 м<sup>2</sup> и испарительные бассейны площадью 5 и 3 м<sup>2</sup>. Эти бассейны крепятся к плоту шарнирно на кардановом подвесе. Проект и рабочие чертежи плавучих бассейнов и кардановых подвесов разработаны ГТИ и высылаются по запросам УГКС.

Плоты и установленное на них оборудование окрашиваются белой масляной краской. Для опознания местоположения плота на водоеме в ночное время по углам плота устанавливаются сигнальные огни, которые питаются током от аккумуляторов или батарей, размещаемых в отсеках поплавков или в специальном ящике.

### 1.1.5 Описание метода

Прямые измерения испарения, реализуются как правило, с поверхности незначительных по своему размеру, резервуаров-испарителей, а также непосредственно с поверхности бассейнов, являющихся испарительными. Для пространственного описания процесса испарения, осуществляющегося с поверхности воды на территории государства сформирована специальная сеть площадок водоиспарительного типа, которая содержит в своей структуре различные сетевые испарители ГГИ-3000, а также эталонные бассейны, площадь которых составляет 20 м<sup>2</sup>.

Испарение между различными датами проводимых наблюдений рассчитывается на основе уравнения водного баланса испарителя или испарительного бассейна:

$$E = P + \Delta h \quad (1)$$

где  $E$  - слой испарения, мм;

$P$  - слой осадков, выпавший между сроками измерения уровня;

$\Delta h = h_{\text{нач}} - h_{\text{кон}}$  - разность высот стояния уровня воды в предыдущий  $h_{\text{нач}}$  и текущий  $h_{\text{кон}}$  сроки наблюдения.

С целью осуществления наблюдений массового характера, а также приведения описания основных особенностей процесса испарения с поверхности водных объектов на территории нашего государства, используют водноиспарительные площадки III типа. В основном, данные площадки имеют испарители ГТИ-3000, как правило они располагаются на площадках метеорологического характера, либо вблизи них.

Основная функция площадок II типа заключается в том, чтобы описывать показатель, а также режим процесса испарения с поверхности водных объектов. В качестве ключевого оборудования в этом случае вступает эталонный бассейн, а также стандартный сетевой испаритель ГТИ-3000.

Основная функция площадок I типа заключается в исследовании процесса испарения, а также формировании максимально эффективного метода наблюдений и реализации различной исследовательской деятельности. Как правило, такого рода площадки оснащены бассейнами испарительного характера площадь которых составляет 100 и 20 м<sup>2</sup>, испарителями различных размеров и типов.

Большое количество ученых, которые занимаются изучением особенностей оценки процесса испарения с поверхности водных объектов, имеются лица, выступающие в качестве сторонников метода испарителей, однако имеются и те, кто не поддерживает указанный метод.

Концепция оценки испарения с поверхности водных объектов, согласно ряду наблюдений наземной сети площадок водоиспарительного характера, представляет особый интерес, что обусловлен тремя важными отношениями.

Прежде всего, данная концепция базируется на достаточно надежно измеренных фактических показателях процесса испарения, реализуемого в природных условиях, с испарителями, то есть водоемов, подвергаемых сравнению. Такого рода сравнимые, а также комплексные особенности климата, также, как и оценка процесса испарения, представляет особое значение в контексте тех или иных обобщений географического характера. Во-вторых, применение испарителей предоставляет возможность проводить наблюдения по всей территории государства, а также объективно подойти к размещению площадок водоиспарительного характера, что представляет собой некоторую базу оперативной оценки рассматриваемого процесса. В-третьих, сведения, такой сети, которая работает регулярно, могут выступать в качестве ключевой базы для осуществления «привязки» результатов детального анализа процесса испарения, которые осуществляется эпизодическим образом на различных отдельных водных объектах.

Опираясь на все указанное выше, в качестве одной из ключевых сторон применения данных реализованных наблюдений сети площадок водоиспарительного характера, выступает вопрос достоверности интерполяции всех сведений, полученных в ходе измерений. Ряд исследований поля процесса испарения с поверхности водных объектов, реализованных такими исследователями, как В. И. Кузнецов, В. С. Голубев и Ю. А. Мауткин, говорят нам о том, что ключевым фактором, который нарушает однородность поля испарения относительно функции корреляционного типа, выступает неравная защищенность площадок водоиспарительного характера.

В горных условиях, где разность отметок поверхности открытых водоиспарительных площадок не превышает 600 м, поле испарения с водной поверхности также является однородным и изотропным и описывается тем же уравнением, что и для равнинной территории:

$$r(l) = 0,92 \exp\left(-\frac{l}{1300}\right) \quad (2)$$

где  $l$  - расстояние между двумя водноиспарительными площадками, км.

Для водных испарителей ГТИ-3000, установленных на открытых площадках, где грунтовые воды или многолетняя мерзлота находится ниже 1 м под поверхностью земли, суммарная ошибка оптимальной интерполяции испарения на середину расстояния между двумя площадками составляет меньше половины естественной временной изменчивости испарения и, как правило, не превышает 10% его месячного значения на расстояниях между площадками до 350 км.

Материалы Наблюдений на защищенных площадках (препятствия расположены не дальше 50 м от испарителей) содержат большую случайную погрешность исходных данных. Мера случайной погрешности исходных данных для таких площадок больше 0,5 и поэтому показания защищенного испарителя не могут быть использованы для интерполяции.

А. Р. Константинов разработал способ определения переходных коэффициентов для испарителя ГТИ-3000 при конкретных погодных условиях теплого сезона, месяцев и декад, характеризующихся соответствующими средними значениями температуры и влажности воздуха, исправленными поправкой на сезонный ход.

Исследования, проведенные П. П. Кузьминым, показали, что переходный коэффициент испарителя ГТИ-3000 слабо зависит от метеорологических условий. Предложенная им формула позволяет рассчитать среднее для сезона значение переходного коэффициента, опираясь только на показания испарителя ГТИ-3000:

$$\bar{a} = 0,98 - 7 * 10^{-4} \bar{E}_{0,3} \quad (3)$$

где  $\bar{a}$  - средний за период наблюдений в данном пункте коэффициент испарителя ГТИ-3000;

$\bar{E}_{0,3}$  - среднее за тот же период наблюдений испарение из этого

испарителя, мм/мес.

А.С. Голубев получил эмпирическую формулу, позволяющую рассчитать значение переходного коэффициента для испарителя ГТИ-3000 по средней скорости испарения за конкретный месяц:

$$\alpha = l - 0,063E^{0,6} \quad (4)$$

где  $E_{0,3}$  - средняя месячная скорость испарения, мм/сут.

Исследования показали, что наиболее точно испарение с поверхности водоема характеризуют показания испарительного бассейна площадью  $20 \text{ м}^2$ , установленного на плоту непосредственно в центральной части акватории. В этих случаях различия испарения с поверхности бассейна и водоема за месяц не выходят за пределы  $\pm 10 \%$ , а за сезон без ледостава - за пределы  $\pm 3 \%$ .

Переход от показаний ( $\bar{E}_{0,3}$ ) плавучего испарителя ГТИ-3000 к испарению с водоема  $\bar{E}_{0,3}$  (мм/мес) осуществляется по формуле:

$$\bar{E}_{0,3} = 0,8 * \frac{\beta}{\alpha} * \frac{e_0 - e_2}{e_0 - e_2} * E_{0,3} \quad (5)$$

где  $\beta$  - поправочный коэффициент на длину разгона воздушного потока над водоемом;

$\alpha$  - коэффициент, характеризующий длину разгона воздушного потока до места установки плавучего испарителя в водоеме;

$e_0$  и  $e_0$  - значения средней месячной максимальной упругости водяного пара, вычисленные по температуре поверхности воды в водоеме и испарителе ГТИ-3000 соответственно;

$e_2$  - средняя месячная абсолютная влажность воздуха на высоте 2 м над плавучей установкой.

Б. Д. Зайков установил, что испарение, измеренное в испарительных бассейнах площадью до 20 м<sup>2</sup>, расположенных на суше на ровном открытом месте, можно использовать практически без корректировки для оценки испарения с поверхности глубоких (6 - 8 м) водоемов площадью до 100 га.

Анализ показывает, что определяющим фактором здесь является не столько площадь водного зеркала водоема, сколько характеристики его проточности и глубина. Если термический режим водной массы формируется в основном за счет поступления солнечной энергии в пределах основной чаши водоема, то расхождения в значениях испарения воды из бассейна и водоема незначительные. В тех случаях, когда проточность водоема значительная, а следовательно, и термический режим его водной массы имеет специфические черты, расхождения в габаритах испарения превышают 10%.

Для оценки месячных норм испарения с поверхности водоемов картами месячных норм испарения из испарительного бассейна непосредственно пользоваться нельзя (необходимо учесть эффект различия в тепловой инерционности водных масс бассейна и водоема), поэтому В. С. Голубевым было определено уравнение множественной линейной регрессии между месячным значением испарения с поверхности водоема и соответствующими показаниями испарителя ГГИ-3000, установленного на суше.

Расчетное уравнение перехода от показаний испарителя ГГИ-3000 к испарению с поверхности водоемов площадью до 1000 км<sup>2</sup> имеет вид:

$$E_{03} = 0,43E_{0,3} + 0,9h_0 - 1,2\Delta h_0 + 2,4\tau_{\text{дн}} - 8,1\Delta\tau_{\text{дн}} - 35 \quad (6)$$

где  $E_{03}$  и  $E_{0,3}$  — месячные нормы испарения соответственно с поверхности водоема и испарителя ГГИ-3000, мм/мес;

$h_0$  и  $\tau_{\text{дн}}$  - полуденная высота Солнца (градус) и продолжительность дня (час) от восхода до захода Солнца на 15-е число месяца;

$\Delta h_0$  и  $\Delta\tau_{\text{дн}}$  - изменение полуденной высоты Солнца (градус) и продолжительность дня (час) между последним и первым днем месяца.

Анализ ошибок расчетов испарения, выполненных по формуле (6), показал, что большие ошибки (более 30%) имеют место для водоемов, у которых средняя глубина превышает 10-15 м и отмечается существенная проточность. Если формулой (6) пользоваться для оценки месячных норм испарения с поверхности водоемов, имеющих среднюю глубину не более 10-15 м, для которых объем протекающей за месяц воды не превышает объема водохранилища и глубина прозрачности воды не менее 0,5 м, то для большей части летнего периода года результат получается вполне надежный.

В тех случаях, когда имеются сведения об испарения по испарительному бассейну площадью 20 м<sup>2</sup>, расположенному вблизи изучаемого водоема, А. Р. Константинов рекомендует выполнять расчет испарения с водоемов площадью до 40 км<sup>2</sup> по формуле:

$$E = K_n * K_{\text{защ}} * \beta E_{20} \quad (7)$$

где  $K_n$  - коэффициент, характеризующий влияние глубины водоема на испарение; он изменяется от 1 до 0,92 и определяется по специально составленной таблице в зависимости от глубины водоема и зоны, в которой он находится;

$K_{\text{защ}}$  - коэффициент, характеризующий защищенность водоема от ветра берегами, лесом, строениями и другими препятствиями; он изменяется от 0,96 до 0,51 и находится в зависимости от отношения средней высоты препятствий к средней длине разгона воздушного потока;

$\beta$  - коэффициент, характеризующий влияние площади водоема  $Q$  на испарение; определяется для тундровой, лесной и лесостепной зон по табл.2, а для остальных зон принимается равным единице;

$E_{20}$  - слой испарившейся воды в испарительном бассейне.



Таблица 1.2 - Значения  $p = f(Q)$ 

$\Omega \text{ км}^2$	0	0,05	0,1	0,5	1,0	2,0	5
$\beta$	1	1,08	1,1	1,1	1,2	1,2	1

## 1.2 Метод водного баланса

Основная суть метода водного баланса заключается в том, что для любого водного объекта или территории можно составить уравнение, которое отражает соотношение между приходом, расходом и запасом воды за определенный период времени. Это уравнение основано на законе сохранения вещества и позволяет изучать различные гидрологические процессы, такие как формирование стока воды в речных бассейнах, колебания уровня и объема озер, морей и т.д. Метод водного баланса широко применяется в гидрологии для анализа гидрологического режима и состояния водных объектов. Согласно данному методу, имеется возможность установить испарение с поверхности водного объекта  $E$ , по следующей формуле:

$$E = x + y_{\text{п}} + y_{\text{п.подз}} - y_0 - y_{\text{о,подз}} \pm \Delta H_{\text{оз}} \quad (8)$$

где  $x$  - осадки, выпадающие на поверхность водоема;

$y_{\text{п}}$  - поверхностный приток;

$y_{\text{п.подз}}$  - подземный приток;

$y_0$  - поверхностный сток из водоема;

$y_{\text{о,подз}}$  - фильтрация или подземный отток из водоема;

$\Delta H_{\text{оз}}$  - изменение запасов воды в водоеме за расчетный промежуток времени.

Как отмечалось ранее,  $E$  является результирующей собственно испарения и конденсации на поверхности водоема.

Уравнением (8) учитываются основные составляющие водного баланса

озера или водохранилища. В зависимости от конкретных условий и периода, за который рассчитывается испарение, количество членов в правой части уравнения может изменяться. В частности, для бессточных озер отсутствует составляющая поверхностного стока. В ряде случаев при незначительном подземном оттоке или фильтрации соответствующие статьи расхода тоже не учитываются. Для некоторых водоемов могут иметь существенное значение другие составляющие водного баланса, например, водозаборы на орошение и водоснабжение, потери воды при шлюзовании судов, временные потери на насыщение пород, слагающих дно и берега водохранилищ и др. При расчетах водного баланса за многолетний период изменения запасов воды в водоеме обычно принимается равным нулю. В действительности, это положение не всегда имеет место и является справедливым в том случае, если при средних многолетних значениях элементов водного баланса среднее значение уровня воды в водоеме соответствует уровню равновесия.

Практическое применение метода водного баланса для расчетов испарения с водоемов заключается в том, что для любого водоема или территории можно составить уравнение, которое отражает соотношение между приходом, расходом и запасом воды за определенный период времени. Испарение с водной поверхности является одним из элементов водного баланса и может быть определено как разность между другими элементами, такими как атмосферные осадки, поверхностный и подземный сток, изменение уровня и объема воды. Этот метод позволяет оценить испарение на основе наблюдений за гидрологическими и метеорологическими параметрами водоема или его окрестностей. Однако этот метод имеет ряд ограничений и недостатков, таких как необходимость большого объема информации, сложность учета всех факторов, влияющих на испарение, возможность ошибок при интерполяции и экстраполяции данных.

### 1.3 Метод теплового баланса

История метода теплового баланса для оценки испарения начинается с работ А.Н. Крылова, который в 1901 году предложил использовать разность между радиационным балансом и турбулентным обменом тепла для определения испарения с водной поверхности. Этот метод основан на учете всех потоков теплоты, поглощаемых и расходуемых рассматриваемым объектом через его границы. Источником теплоты является солнечное излучение, а основными факторами, влияющими на испарение, являются температура и влажность воздуха, скорость ветра, температура и уровень воды. Метод теплового баланса требует многочисленных и точных измерений, различных составляющих баланса, таких как радиация, конвекция, кондукция, латентное тепло и др. Этот метод также должен учитывать различные особенности рассматриваемого объекта, такие как ледяной и снежный покров, подземный сток и приток, изменение запаса теплоты в водоеме и др. Метод теплового баланса является наиболее точным и надежным методом оценки испарения, но он сложен в применении и требует большого объема информации. Поэтому он чаще используется для научных исследований, чем для практических целей. Метод предусматривает использование уравнения водного баланса, записанного для водной поверхности в следующем виде:

$$R = L_H * E + P + B \quad (9)$$

где R - радиационный баланс;

$L_H$  - удельная теплота испарения;

E - Испарение;

P - турбулентный теплообмен между водной поверхностью и воздухом;

B - теплообмен между водной поверхностью и нижележащими слоями воды.

В уравнении (9) приведены только главные составляющие теплового баланса.

С учетом известного отношения Боуэна, устанавливающего связь между количеством теплоты, получаемой водной поверхностью от воздуха при турбулентном теплообмене, и количеством теплоты, затрачиваемой на испарение, уравнение (9) относительно испарения примет вид:

$$E = \frac{R-B}{[L_H^*]1-\alpha dt/dq]} \quad (10)$$

где  $t$  и  $q$  - коэффициенты турбулентности переноса теплоты и водяного пара;

$$\alpha = c_p / L_H,$$

$c_p$  — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

Подставив средние значения удельной теплоты испарения воды ( $U = 2500$  кДж / кг ) и удельной теплоемкости воздуха ( $c_p = 1,0$  кДж / ( кг\*°С ), а также перейдя от удельной влажности  $q$  к парциальному давлению водяного пара в воздухе  $e$ , пренебрегая при этом поправкой на давление, вместо (10) получим:

$$E = (R - B) / [250 * (1 + 0,64 * \frac{\Delta t}{\Delta e})] \quad (11)$$

где  $E$  в мм/ч;

$R$  и  $B$  в кДж / (м<sup>2</sup>\*ч);

$\Delta t$  - разность температуры поверхности воды и воздуха, измеренной на высоте 2 м;

$\Delta e$  - дефицит насыщения на высоте 2 м.

Таким образом, отметим, что метод теплового баланса для оценки

испарения основан на равенстве потока тепла в водной поверхности и потока тепла из нее. Этот метод позволяет учитывать влияние различных факторов, таких как солнечная радиация, температура воздуха и воды, скорость ветра и атмосферное давление. Однако этот метод требует большого количества данных и сложных расчетов, поэтому он не очень популярен на практике.

### 1.4 Метод турбулентной диффузии

Метод турбулентной диффузии - это один из способов оценки испарения с поверхности водоема, основанный на теории турбулентного обмена влаги в атмосфере. Этот метод позволяет учесть влияние скорости ветра, температуры и влажности воздуха, атмосферного давления и шероховатости подстилающей поверхности. Однако этот метод требует знания коэффициента турбулентной диффузии, который зависит от многих факторов и сложно определяется на практике. Также этот метод не учитывает рельеф поверхности и изменение метеорологических параметров в пространстве и во времени.

С целью вывода формулы для расчета испарения по методу турбулентной диффузии запишем дифференциальное уравнение переноса водяного пара в турбулентной атмосфере:

$$p \left( \frac{dq}{dr} + v_x * \frac{dq}{dx} + v_y * \frac{dq}{dy} + v_z * \frac{dq}{dz} \right) = \frac{q}{dx} * \left( pk_x * \frac{dq}{dx} \right) + \frac{q}{dy} * \left( pk_y * \frac{dq}{dy} \right) + \frac{q}{dz} * \left( pk_z * \frac{dq}{dz} \right) \quad (12)$$

где q - удельная влажность воздуха (количество водяного пара в граммах в 1 кг влажного воздуха);

$v_x, v_y, v_z, k_x, k_y, k_z$ - соответственно проекции скорости воздушного потока и коэффициента турбулентного обмена на оси координат x, y, z.

К настоящему времени предложено довольно большое число формул для

определения этого коэффициента. Подробный анализ этих формул выполнен в работе В. И. Бабкина. Он пришел к выводу, что значения коэффициентов турбулентного обмена  $k$ , рассчитанных по схемам М. И. Будыко, М. П. Тимофеева, Д. Л. Лайхмана, А. Р. Константинова, значительно различаются. Следовательно, при использовании их при расчете испарения по формуле также получим различные ответы. Одновременно им предложена своя полуэмпирическая схема расчета коэффициента  $k$ . Эта схема предусматривает в расчете  $k$  использовани. одной из эмпирических формул расчета испарения, рассмотренных ниже. В. И. Бабкин также отмечает, что наилучшие результаты при расчете испарения получаются при применении коэффициента  $k$ , вычисленного по формулам А. Р. Константинова и М. И. Тимофеева и значительно хуже при их оценке по схемам М. И. Будыко и Д. Л. Лайхмана.

Изучая структуру турбулентного воздушного потока в приземном слое, А. Р. Константиной использовал следующее выражение для коэффициента турбулентного обмена при равновесной стратификации.

$$K = x^2 * z * u_1 / \ln \left( \frac{z_1}{z_0} \right) \quad (13)$$

где  $x = 0,38$  - постоянная Кармана;

$z$  - высота измерения;

$z_0$  - высота шероховатости, т. е. уровень, на котором скорость ветра равна нулю;

$u_1$  - скорость ветра на высоте  $Z_1 = 1$  м.

## 1.5 Пульсационный метод

Пульсационный метод — это метод измерения скорости испарения с водной поверхности с помощью датчика, который создает небольшие колебания давления в потоке и измеряет их частоту. Этот метод основан на использовании уравнения переноса водяного пара в атмосфере, учитывающего

турбулентный характер движения воздуха. Этот метод практического применения для расчета испарения не получил из-за отсутствия высокочувствительной аппаратуры для измерения пульсаций влажности воздуха.

Преимущества пульсационного метода измерения испарения заключаются в том, что он позволяет учитывать турбулентность воздушного потока и не зависит от характеристик поверхности воды. Этот метод также может быть применен для измерения испарения с естественных поверхностей. Однако этот метод требует высокочувствительной аппаратуры для измерения пульсаций влажности воздуха, которая не всегда доступна.

Недостатки пульсационного метода измерения испарения могут быть связаны с тем, что он требует сложной и дорогостоящей аппаратуры, которая должна быть калибрована и настроена для разных условий. Также этот метод может быть чувствителен к помехам от других источников колебаний давления или влажности воздуха, таких как ветер, турбулентность или осадки. Еще одним недостатком может быть то, что этот метод измеряет только испарение с поверхности воды, а не суммарное испарение с воды и растений.

Точность пульсационного метода измерения испарения зависит от качества и чувствительности датчика, который измеряет пульсации влажности воздуха. Я не нашел точных данных о точности этого метода, но нашел аналогичный метод, который использует тепловые импульсы для измерения испарения с почвы. Этот метод был проверен с помощью весового лизиметра и показал хорошую точность и прецизионность. Ошибка измерения испарения с помощью тепловых импульсов составляла от -1 до 8% от истинного значения, а среднеквадратичная ошибка была 0.15 мм/день. Возможно, пульсационный метод имеет схожую точность, если использовать аналогичную аппаратуру и методику.

Известно, что потоки воздуха в атмосфере почти всегда имеют турбулентный характер движения. Поэтому уравнение переноса водяного пара в атмосфере необходимо привести к виду, учитывающему этот характер

движения. Для этой цели пользуются методом осреднения по времени входящих в уравнении величин, предложенным О. Рейнольдсом. Перед осреднением все переменные величины представляются в виде:

$$N = \bar{N} + N' \quad (14)$$

где  $\bar{N}$  - среднее значение переменной величины;  $N$  и  $N'$  - её пульсационная добавка.

После выполнения осреднения, с соблюдением всех его свойств, проводится анализ полученного уравнения при следующих допущениях: а) фазовые переходы водяного пара в воздухе отсутствуют; б) градиенты характеристик атмосферы в горизонтальных направлениях равны нулю; в) по высоте приземного слоя атмосферы вертикальный поток пара постоянный. В результате получим выражение для расчета испарения в виде:

$$E = p w q' \quad (15)$$

где  $w'$  и  $q'$  - пульсационные добавки соответственно скорости ветра и удельной влажности.

Формула (15) имеет простой вид, однако этот метод практического применения для расчета испарения не получил из-за отсутствия высокочувствительной аппаратуры.

## 1.6 Расчет испарения по эмпирическим формулам

Методы расчета испарения по полуэмпирическим и эмпирическим формулам основаны на использовании различных метеорологических



параметров, таких как температура воздуха и воды, дефицит упругости водяного пара, скорость ветра, солнечная радиация и др. Например, формула ГГИ для расчета месячной величины испарения с водной поверхности имеет вид:

$$E = 0,14\pi(e_0 - e_2)(1 + 0,72u_2) \quad (16)$$

где  $E$  - испарение (мм/месяц),  $\pi$  - число дней в месяце,  
 $e_0$  - насыщенное давление водяного пара над поверхностью воды (гПа),  
 $e_2$  - фактическое давление водяного пара на высоте 2 м над поверхностью воды (гПа),  
 $u_2$  - средняя скорость ветра на высоте 2 м над поверхностью воды (м/с).

Эта и другие формулы требуют наличия достаточных и достоверных данных о метеорологических условиях, которые не всегда доступны или измерены с высокой точностью. Кроме того, эти формулы не учитывают некоторые факторы, влияющие на испарение, такие как характеристики поверхности воды, наличие растительности, сезонные и дневные изменения температуры и влажности и др. Поэтому эти методы могут давать только приблизительные оценки испарения, которые могут отличаться от реальных значений.

Указанная формула рекомендуется Указаниями для расчета испарения с водной поверхности в условиях равновесной стратификации атмосферы в приводном слое, т.е. когда разность значений температуры воды и воздуха не превышает  $4^{\circ}\text{C}$ . При наличии неравновесных условий в приводном слое воздуха необходимо рассчитывать испарение по формуле В. А. Рымши и Р. В. Донченко либо по формуле А. П. Браславского и С. Н. Нургалиева.

Учет влияния неустойчивости атмосферы над водной поверхностью на испарение впервые был осуществлен в 1936 г. в ледотермической лаборатории ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева Б. В. Проскураковым, затем в работе М. И. Будыко

« Испарение в естественных условиях » (1948 г.), а в натуральных условиях при изучении теплотерь с полыньи В. А. Рымшей и Р. В. Донченко (1958 г.), при изучении испарения с водоемов А. П. Браславским и С. Н. Нургалиевым (1966 г.), Л. Г. Шуляковским (1969 г.), а также теоритическим путем А. Р. Константиновым (1968 г.). Указанные исследователи показали, что интенсивность испарения прямо пропорциональна разности температуры воды и воздуха не только в штилевых условиях, но и при слабом ветре. Поэтому в последние годы формула (16) была уточнена введением еще одного слагаемого, зависящего от разности температуры испаряющей поверхности воды и воздуха на высоте 2 м. Введением этой характеристики учитывается скорость отвода водяных паров от испаряющей поверхности в атмосферу. Эта формула имеет следующий вид:

а) В. А. Рымши и Р. В. Донченко

$$E = 0,104(k_l + u_2) * (e_0 - e_2) \quad (17)$$

где  $k_l = f_1(\Delta\theta)$  - коэффициент, зависящий от разности температуры поверхности воды и воздуха на высоте 2м ( $t_n - \theta_2$ ), определяется по табл. 3.

Формула (17) рекомендуется для расчета испарения с незамерзающих водоемов;

б) Л. Г. Шуляковского

$$E = [0,15 + 0,112u_2 + 0,094(t_n - \theta_2)] * (e_0 - e_2) \quad (18)$$

в) А. Р. Константинова

$$E = \left( \frac{0,024(t_n - \theta_2)}{u_l} + 0,116u_l \right) * (e_0 - e_2) \quad (19)$$

г) А. П. Браславского и С. Н. Нурғалиева

$$E = 0,14[1 + 0,8u_2 + k_2] * (e_0 - e_2) \quad (20)$$

где  $k_2 = f_2(\Delta\theta)$  - функция, зависящая от разности температуры поверхности воды и воздуха ( $t_n - \theta_2$ ).

Таблица 1.3 - Значения  $k_1 = f_1(\Delta\theta)$

$\Delta\theta$	0	1	2	3	4	5	6
$k_1$	1,28	1,54	1,80	2,10	2,30	2,56	2,80
$\Delta\theta$	10	12	15	20	25	30	40
$k_1$	3,08	3,33	3,58	3,84	4,10	4,35	4,60

Формула (20) в настоящее время включена в рекомендации по термическому расчету водохранилищ, разработанные во ВНИИГе им. Б. Е. Веденеева. Примером эмпирической формулы другого типа, чем приведенная выше, является формула Н. Н. Иванова:

$$E = 0,0018(25 + \theta_2)^2 * (100 - r_2) \quad (21)$$

где  $E$  - слой испарившейся воды, мм/месс;

$\theta_2$  л  $r_2$  - средние месячные температура и относительная влажность воздуха.

Формула (21) дает менее точные значения испарения, так как относительная влажность отражает дефицит насыщения на высоте 2 м над поверхностью воды, а не дефицит насыщения, вычисленный как разность между давлением насыщенного водяного пара при температуре испаряющей поверхности и парциальным давлением водяного пара в воздухе на высоте 2

м. Поэтому формула (21) может быть применена только в приближенных расчетах.

## 2. Сравнение результатов расчета по формулам различных авторов

Эмпирические формулы широко используются при расчетах испарения с водных объектов. В настоящее время известно много эмпирических формул различных авторов. Практика показывает, что при расчете испарения с одного и того же водного объекта, за один и тот же период времени, эти формулы дают различные результаты.

Целью работы является выяснение, как сильно расходятся результаты расчетов испарения по формулам ГГИ, Браславского и Нургалиева, Шуляковского и Константинова, Лайхтмана и Тимофеева, т.е. по формулам, наиболее часто употребляемым на практике при оценке испарения с водных объектов. При этом представляется интересным проследить, как зависят эти расхождения от определяющих факторов, т.е. от скорости ветра и разности температур поверхности воды и воздуха.

Методика исследований сводилась к следующему:

За эталон была принята формула ГГИ, с результатами расчета по которой производилось сравнение результатов расчета по формулам упомянутых авторов. Выбор формулы (16) в качестве эталонной обусловлен только тем, что она рекомендована к использованию в «Указаниях по расчету испарения с водной поверхности», т.е. в нормативном документе.

### 2.1 Расчет и анализ отношений $n_{21}$

Формула А. П. Браславского и С. Н. Нургалиева. В работе рассматривается отношение коэффициентов  $a$  в формулах, т.е. отношение

$$n_{21} = 0,14[1 + 0,8u_2 + k_2]/0,14(1 + 0,72u_2) \quad (22)$$

Коэффициент  $n_{21}$  будет показывать на сколько занижается или завышается рассчитанное значение испарение по формуле (20). Для этого значения  $u_2$  задавались от 1 м/с до 10 м/с, через 1 м/с, значения  $\Delta\theta$  задавались в диапазоне от минус 10°C до + 10°C через 1°C.

Результаты расчетов приведены в таблице 4, по данным которой был построен график (рис. 8). Данные табл. 4 и (рис. 8) показывают, что значения  $n_{21}$  изменяются в широких пределах. Отклонения от единицы особенно велики при малых (1-2 м/с) скоростях ветра и больших по абсолютному значению  $\Delta\theta$  (диапазоны от 3 до 10°C и от минус 4 до минус 10°C). Обращает на себя внимание тот факт, что при неустойчивой стратификации ( $\Delta\theta > 0$ ) формула (20) дает в среднем заметно большие отклонения от единицы, чем при устойчивой стратификации ( $\Delta\theta < 0$ ). Однако надо учесть, что для реальных условий принятый диапазон изменений скорости ветра  $u_2$ , и разности температур  $\Delta\theta$ , чрезвычайно широк. По-видимому, можно считать, что в естественных условиях, декадные и месячные значения  $u_2$  и  $\Delta\theta$  (именно для таких интервалов времени чаще всего применяются рассматриваемые формулы) изменяются в более узких диапазонах. Как показывают исходные данные ряда курсовых работ, выполненных студентами РГГМУ по теме

Таблица 2.1 - Расчет коэффициента  $n_{21}$ 

$\Delta\theta$	СКОРОСТЬ ВЕТРА и, М/С									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	1,70	1,53	1,44	1,37	1,33	1,30	1,27	1,26	1,25	1,24
9	1,66	1,50	1,41	1,35	1,32	1,29	1,26	1,24	1,24	1,23
8	1,61	1,46	1,38	1,33	1,30	1,27	1,25	1,23	1,23	1,22
7	1,55	1,42	1,35	1,30	1,28	1,25	1,23	1,22	1,21	1,20
6	1,49	1,38	1,32	1,28	1,26	1,23	1,22	1,20	1,20	1,19
5	1,43	1,34	1,29	1,25	1,23	1,21	1,20	1,19	1,19	1,18
4	1,36	1,29	1,25	1,22	1,21	1,19	1,18	1,17	1,17	1,17
3	1,29	1,24	1,21	1,19	1,18	1,17	1,16	1,15	1,16	1,15
2	1,22	1,19	1,17	1,15	1,15	1,14	1,14	1,13	1,14	1,13
1	1,13	1,13	1,13	1,12	1,12	1,12	1,11	1,11	1,12	1,12
0	1,05	1,07	1,08	1,08	1,09	1,09	1,09	1,09	1,10	1,10
-1	0,96	1,00	1,03	1,04	1,05	1,06	1,06	1,07	1,08	1,08
-2	0,87	0,94	0,98	1,00	1,02	1,03	1,04	1,04	1,06	1,06
-3	0,79	0,89	0,94	0,98	0,99	1,01	1,02	1,02	1,04	1,05
-4	0,73	0,84	0,90	0,94	0,97	0,99	1,00	1,01	1,03	1,03
-5	0,67	0,80	0,87	0,91	0,93	0,97	0,98	0,99	1,01	1,02
-6	0,62	0,77	0,85	0,89	0,93	0,95	0,97	0,98	1,00	1,01
-7	0,59	0,75	0,82	0,87	0,92	0,94	0,96	0,99	0,99	1,00
-8	0,56	0,72	0,81	0,86	0,91	0,93	0,95	0,98	0,99	1,00
-9	0,54	0,71	0,80	0,85	0,90	0,92	0,94	0,98	0,98	0,99
-10	0,53	0,70	0,79	0,85	0,89	0,92	0,94	0,97	0,98	0,99

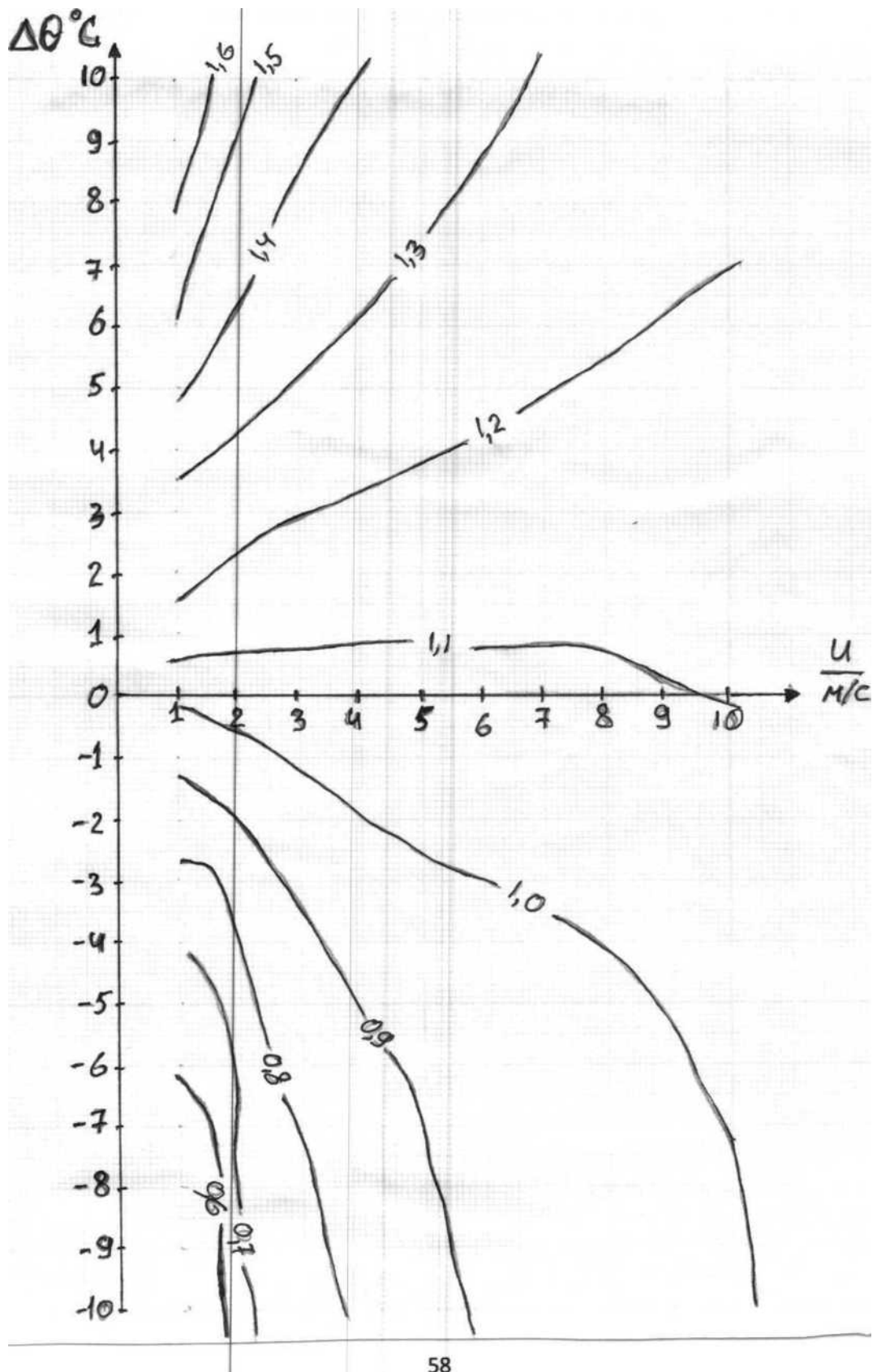


Рис. 2.1 - Зависимость отношения  $n_{21}$  от скорости ветра и разности температур:  $n_{21} = f(u_2, \Delta\theta)$ .

«Испарение с водной поверхности» в теплый период на Северо-Западе России месячные значения скорости ветра колеблются от 2 до 6 м/с, а значение

$\Delta\theta$  очень редко выходят из интервала  $-4 / +4^{\circ}\text{C}$ . Тогда для названных интервалов скорости ветра и разности температур водной поверхности и воздуха по данным табл. 4. можно сказать, что при неустойчивой стратификации ( $\Delta\theta > 0$ ) формула (16) завышаем значения испарения по сравнению с формулой (16) на 10-20%. При устойчивой стратификации ( $\Delta\theta < 0$ ) формула (20) дает занижение по сравнению с (20), примерно на 5%.

Формула Л. Г. Шуляковского. Рассматривая отношение формулы (18) к формуле (16), получим выражение:

$$n_{31} = \left[ 0,15 + 0,112u_2 + 0,094(t_n - \theta_2)^{\frac{1}{3}} \right] / 0,14(1 + 0,72u_2) \quad (23)$$

Результаты расчета приведены в таблице 6, по данным которой построен график (рис. 9). Различия результатов по формуле (18) от формулы (16) представлены в долях от единицы. Данные табл.5 показывают, что формула (18) дает заметно большие расхождения с формулой ГГИ, чем (20) во всем диапазоне изменений  $u_2$  и  $\Delta\theta$ , особенно велики отклонения значений  $n_{31}$  от единицы при скоростях ветра от 1 м/с до 4 м/с, где они доходят до значений 1.92 при неустойчивой стратификации и до 0,25 при устойчивой стратификации. Так же как и формула (20), формула (18) при ( $\Delta\theta > 0$ ) дает в среднем заметно большие расхождения с формулой (16), чем при ( $\Delta\theta < 0$ ).

В диапазоне наиболее реальных значений  $u_2$  и  $\Delta\theta$ , формула Л. Г. Шуляковского завышает значения испарения по сравнению с формулой ГГИ от 10 до 30 и даже до 50% при неустойчивой стратификации и занижает при устойчивой стратификации на 10-20%».



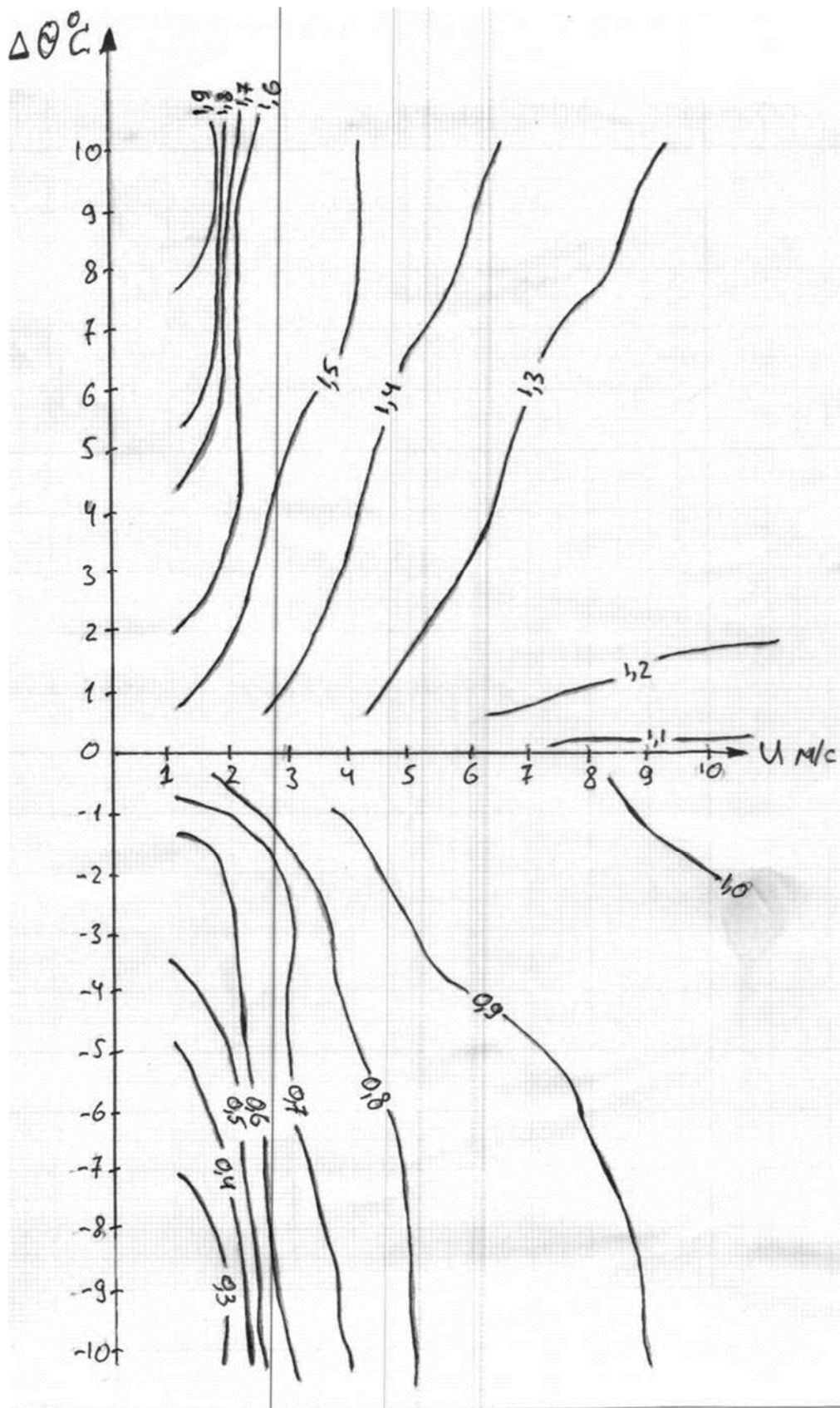


Рис. 2.2 - Зависимость отношения  $n_{31}$  от скорости ветра и разности температур  $n_{31}=f(u_2, \Delta\theta)$ .

Таблица 2.2 - Значения  $n_{31}$

$\Delta\theta$	СКОРОСТЬ ВЕТРА и, М/С									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	1,92	1,69	1,57	1,48	1,42	1,38	1,33	1,31	1,29	1,28
9	1,88	1,66	1,54	1,46	1,41	1,36	1,32	1,30	1,29	1,27
8	1,88	1,66	1,54	1,46	1,41	1,36	1,32	1,30	1,29	1,27
7	1,84	1,63	1,52	1,44	1,39	1,35	1,30	1,29	1,28	1,26
6	1,80	1,60	1,50	1,43	1,37	1,34	1,29	1,28	1,27	1,25
5	1,76	1,57	1,48	1,41	1,36	1,32	1,28	1,27	1,26	1,24
4	1,67	1,51	1,43	1,37	1,33	1,30	1,26	1,25	1,24	1,23
3	1,63	1,48	1,40	1,35	1,31	1,28	1,25	1,24	1,23	1,22
2	1,59	1,45	1,38	1,33	1,30	1,27	1,23	1,23	1,22	1,21
1	1,48	1,38	1,32	1,28	1,26	1,23	1,20	1,20	1,19	1,19
0	1,09	1,10	1,10	1,11	1,11	1,11	1,09	1,10	1,10	1,10
-1	0,69	0,81	1,90	0,94	0,96	0,98	0,98	1,00	1,01	1,02
-2	0,58	0,73	1,84	0,89	0,92	0,94	0,95	0,98	0,99	1,00
-3	0,54	0,70	1,82	0,87	0,91	0,93	0,94	0,98	0,98	0,99
-4	0,50	0,68	1,79	0,85	0,89	0,92	0,93	0,97	0,97	0,98
-5	0,42	0,62	1,74	0,81	0,86	0,89	0,91	0,94	0,95	0,96
-6	0,37	0,59	1,73	0,80	0,84	0,88	0,90	0,93	0,94	0,96
-7	0,33	0,56	1,70	0,78	0,83	0,86	0,88	0,91	0,93	0,95
-8	0,29	0,53	1,68	0,76	0,81	0,85	0,87	0,90	0,92	0,94
-9	0,29	0,53	1,68	0,76	0,81	0,85	0,87	0,90	0,92	0,94
-10	0,25	0,50	1,66	0,74	0,80	0,84	0,86	0,89	0,91	0,92

Формула А. Р. Константинова. Рассматривая отношение формулы (19) к формуле (16), получаем следующее выражение:

$$n_{41} = \left( \frac{0,024(t_n - e_2)}{u_1} + 0,116u_1 \right) / 0,14(1 + 0,72u_2) \quad (24)$$

Здесь  $u_1$  надо привести к высоте 2 м. Считаем, что скорость ветра имеет логарифмическое распределение по высоте, т.е.:

$$u = \left( \frac{V_x}{\chi} \right) * \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \quad (25)$$

где  $V_x$  - динамическая скорость, м/с;

$\chi$  - постоянная Кармана = 0,38;

$z_0$  - параметр шероховатости, т.е. высота на которой скорость ветра обращается в нуль.

Тогда:

$$u_2 = \left( \frac{V_x}{\chi} \right) * \ln \left( \frac{z_2}{z_0} \right) \quad (26)$$

$$u_1 = \left( \frac{V_x}{\chi} \right) * \ln \left( \frac{z_1}{z_0} \right) \quad (27)$$

$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{\ln \left( \frac{z_2}{z_0} \right)}{\ln \left( \frac{z_1}{z_0} \right)} - 1,15 \quad (28)$$

$$u_1 = \frac{u_2}{1,15} = 0,87u_2 \quad (29)$$

Выражение для формулы (19) будет

$$E = \left( \frac{0,028\Delta\theta}{u_2} + 0,1u_2 \right) * (e_0 - e_2) \quad (30)$$

Результаты расчета отношения  $p_{41}$  приведены в таблице 6, по которой построен график (рис. 10). Данные таблицы 6 показывают, что формула (19) дает заниженные результаты по сравнению с формулой ГГИ во всем диапазоне изменений  $u_2$  и  $\Delta\theta$ , исключая очень большие положительные  $\Delta\theta$ , и малые

значения  $u_2$ , которые маловероятны для декадных и месячных интервалов времени. Особенностью формулы (19) является то, что при скорости ветра 1 м/с и при значениях  $\Delta\theta$  от минус 4 до минус 10°C она дает отрицательные значения испарения, что при  $(e_0 - e_2) > 0$  физически невозможно.

В диапазоне наиболее реальных значений  $u_2$  и  $\Delta\theta$ , формула А. Р. Константинова дает занижение значений испарения на 15-20%, как при неустойчивой, так и при устойчивой стратификациях.

Формула Лайхтмана и Тимофеева. Рассматривая отношение формулы (26) к формуле (16), получаем выражение:

$$n_{51} = 0,12u_2/0,14(1 + 0,72u_2) \quad (31)$$

Результаты расчета приведены в таблице 7, по данным которой построен график (рис. 11). В данном отношении не учитывается разность температур  $\Delta\theta$ , и весь расчет производится по скорости ветра  $u_2$ , которая изменяется от 0 до 10 м/с. Данные таблицы 7 показывают, что формула (26) по отношению к формуле (16) дает заниженные результаты измерений в диапазоне от 0 до 5 м/с, и практически одинаковые результаты при скорости ветра от 6 до 10 м/с.

Таблица 2.3 - Значения  $n_{41}$ 

$\Delta\theta$	СКОРОСТЬ ВЕТРА и, М/С									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	1,58	1,00	0,89	0,87	0,87	0,87	0,87	0,88	0,89	0,89
9	1,46	0,96	0,87	0,86	0,86	0,87	0,86	0,87	0,88	0,89
8	1,33	0,91	0,85	0,84	0,85	0,86	0,86	0,87	0,88	0,89
7	1,25	0,88	0,83	0,83	0,84	0,86	0,86	0,87	0,88	0,89
6	1,12	0,84	0,82	0,81	0,83	0,85	0,85	0,86	0,87	0,88
5	1,00	0,79	0,79	0,80	0,82	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88
4	0,87	0,75	0,76	0,79	0,82	0,84	0,84	0,86	0,87	0,88
3	0,75	0,71	0,74	0,78	0,81	0,83	0,84	0,85	0,87	0,88
2	0,67	0,68	0,72	0,77	0,80	0,82	0,83	0,85	0,86	0,87
1	0,54	0,63	0,70	0,75	0,79	0,82	0,83	0,85	0,86	0,87
0	0,41	0,59	0,68	0,74	0,78	0,81	0,82	0,84	0,86	0,87
-1	0,29	0,54	0,66	0,73	0,77	0,80	0,82	0,84	0,85	0,87
-2	0,16	0,50	0,64	0,71	0,76	0,79	0,81	0,83	0,85	0,86
-3	0,08	0,51	0,62	0,70	0,76	0,79	0,81	0,83	0,85	0,86
-4	-0,04	0,43	0,60	0,69	0,75	0,79	0,80	0,83	0,84	0,86
-5	-0,17	0,38	0,57	0,67	0,74	0,78	0,80	0,82	0,84	0,86
-6	-0,29	0,34	0,55	0,66	0,73	0,77	0,79	0,82	0,84	0,85
-7	-0,42	0,29	0,53	0,65	0,72	0,77	0,79	0,81	0,83	0,85
-8	-0,50	0,26	0,51	0,64	0,71	0,76	0,79	0,81	0,83	0,85
-9	-0,62	0,22	0,49	0,62	0,70	0,75	0,78	0,81	0,83	0,85
-10	-0,75	0,18	0,47	0,61	0,69	0,75	0,78	0,80	0,83	0,84

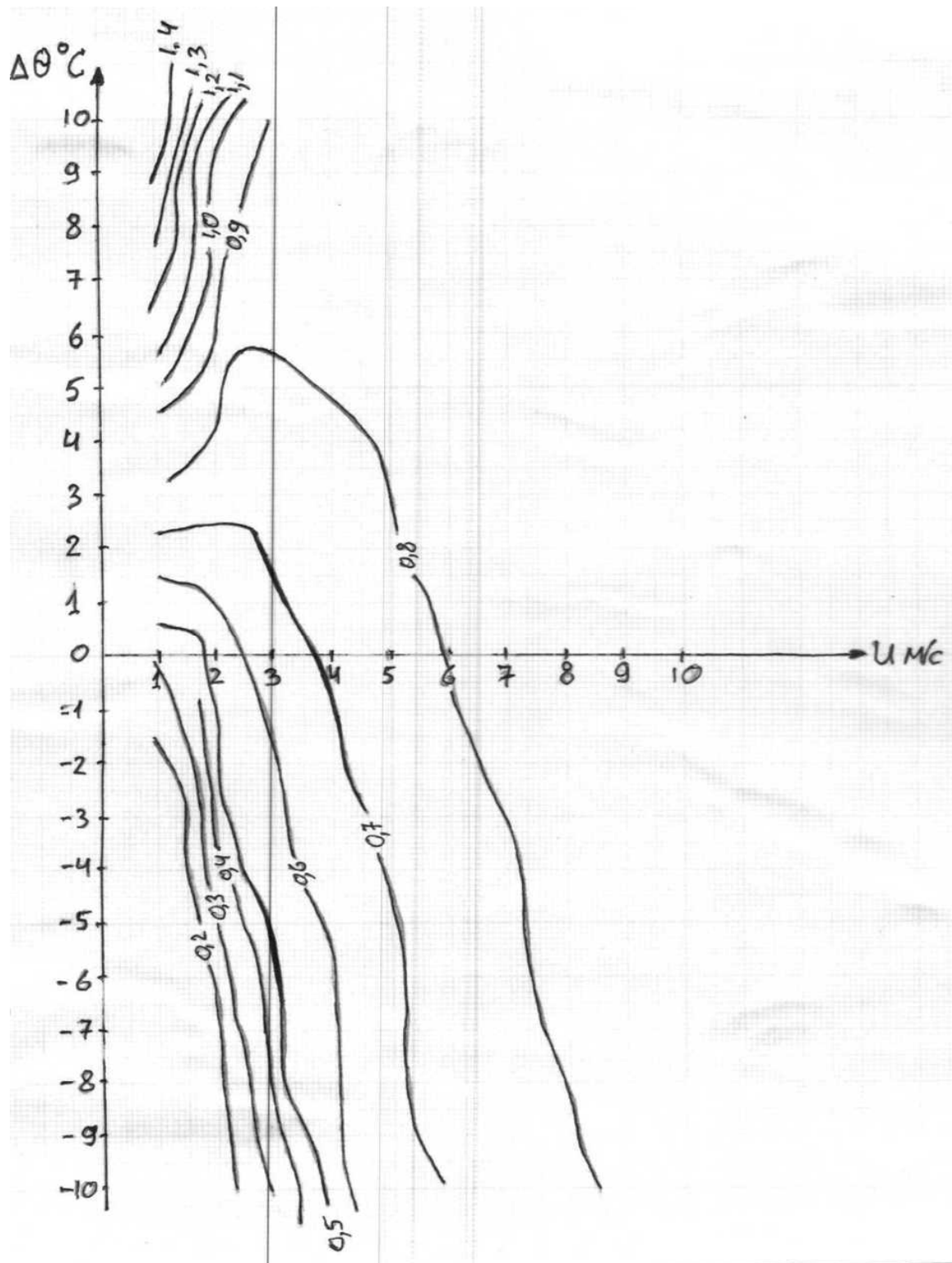


Рис. 2.3 - Зависимость отношения  $n_{41}$  от скорости ветра и разности температур  $n_{41}=f(u_2, \Delta\theta)$ .

Таблица 2.4 - Значения  $n_{51}$ 

$u_2$	$n_{51}$
0	0
1	0,50
2	0,70
3	0,81
4	0,88
5	0,93
6	0,96
7	0,99
8	1,01
9	1,03

### **3 Оценка испарения с поверхности водоемов в различных природных зонах по эмпирическим формулам**

В данном разделе работы мы попытались оценить сколь велики могут быть расхождения в оценках испарения с водоемов, расположенных в различных природных зонах, по формулам, рассмотренными в предыдущей главе. Для этих целей были выбраны четыре озера: Ладожское, Онежское, Ильмень, Белое и Цимлянское водохранилище. Избранные водоемы заметно различаются как по площади водной поверхности, так и по средней глубине.

Расчеты производились по средним годовым данным, по формуле ГГИ, т.к. она рекомендована к использованию в «Указаниях по расчету испарения с водной поверхности».

Целью данной работы является сравнение результатов расчетов испарения с водной поверхности озер, в зависимости от их географического положения, морфологических и гидрологических характеристик, а также сопоставление результатов расчетов по формуле ГГИ с формулами других авторов. При этом представляется интересным проследить, как зависят эти расхождения от определяющих факторов, т.е. от скорости ветра и разности температур поверхности воды и воздуха.

Все результаты расчетов испарения с водной поверхности озер приведены в табличной форме, с добавлением графиков, которые позволяют наглядно представить полученные результаты и проследить различие между расчетами испарения: водной поверхности по формулам различных авторов.

Расчеты испарения с водной поверхности озер проводились за теплый период года с мая по октябрь включительно, отдельно за каждый месяц, и в целом за весь период. При этом в качестве исходных данных использовались средние многолетние значения метеоэлементов за месяцы теплого периода, которые заимствовались из справочников по климату и ОГХ. Обращаясь к средним многолетним значениям, а не к значениям за конкретные годы, мы хотели получить более объективные результаты, независящие от погодных условий конкретного года.

### **3.1 Краткое физико-географическое описание районов расположения водных объектов**

Северо-Запад Европейской части России. Ладожское, Онежское и озеро Ильмень расположены на Северо-Западе Европейской части России. По характеру геологического и геоморфологического строения территория подразделяется на две области: Карелию и Северо-Запад.

Карелия, в основном характеризуется холмисто-равнинным рельефом с абсолютными отметками, не превышающими 200 м над уровнем моря. Частая смена гряд и холмов различного рода понижениями придает поверхности Карелии чрезвычайно расчлененный характер; несмотря на сравнительно малые относительные высоты. Рельеф определяет особенности географической сети Карелии. На значительной её части реки прокладывают свой путь в направлении с северо-запада на юго-восток; также ориентирована большая часть озер. С запада и северо-запада местность в целом понижается по направлению к трем крупным водным бассейнам, где наблюдаются наименьшие абсолютные высоты. Рельеф водораздельных пространств между



Онежским озером и Белым морем, Онежским и Ладожским озерами (100-300м) над уровнем моря, в целом спокойный, слабо расчлененный с незначительным колебанием относительных высот.

Территория Северо-Запада по характеру рельефа отчетливо разделяется на две части: а) северо-западную низменную и б) восточную, юго-восточную и южную возвышенную. Понижения рельефа в виде обширных низменностей с абсолютными отметками от 0 до 50 м, редко более, расположены в северной, центральной и западной частях территории. Возвышенная часть территории Северо-запада расположена в пределах Валдайской возвышенности, которая широкой дугой окаймляет Прибалтийскую низменность и тянется от восточного побережья Онежского озера до г. Великие Луки.

В геологическом отношении территория Карелии является восточной частью Балтийского ил и Фенноскандинавского кристаллического щита и представляет собой область распространенных преимущественно древнейших кристаллических пород архейско-протерозойского комплекса. Древнейшие архейские и протерозойские образования в Карелии представлены изверженными и обломочно-осадочными породами, метаморфизированными в толщу кристаллических сланцев. Породы протерозойского возраста распределены к северо-западу от Онежского озера, протягиваясь полосой до озер Куйто, а также к Северо-западу от Ладожского озера. Молодые архейские образования представлены гнейсовыми гранитами под общим названием гнейсо-гранитов.

Территория Северо-запада в отличие от Карелии сложена, в основном, осадочными породами палеозойского комплекса, и расположена почти целиком в пределах Русской платформы и сложена комплексом осадочных дочетвертичных отложений, залегающими под четвертичными на архейском или протерозойском кристаллическом основании.

По характеру почвообразований территория может быть разделена на две зоны: северную и южную. Граница между ними проходит примерно на широте Ладожского и Онежского озер. Почвообразующей породой в северной

части являются ледниковые наносы, преимущественно неоднородные, грубые по механическому составу; в южной части моренные отложения имеют различный состав — от песков глин, что и определяет различие в механическом составе почв. На Онежско-Ладожском водоразделе преобладают слабоподзолистые почвы, развитые на суглинистых и супесчаных породах. На восточно-онежской равнине преобладают суглинистые и песчаннопылеватые почвы. В южной части Карелии встречаются также и дерново-подзолистые почвы. На территории, расположенной к югу от Онежского и Ладожского озер, широко распространены слабо и среднеподзолистые почвы, подзолистые и болотные. Изредка встречаются дерново-карбонатные и аллювиальные почвы. В Новгородской области наибольшее распространение имеют дерново-подзолистые и все разновидности подзолистых почв. На восточном побережье озера Ильмень распространены аллювиально-луговые почвы. Волховско-Ильменьская низменность к северу от озера Ильмень сложена, главным образом, ленточными глинами. В отдельных местах встречаются карбоновые отложения, но они находятся на значительной глубине и роль их в почвообразовании незначительна.

Территория Северо-Запада расположена в основном в Южной подзоне тайги; лишь небольшая северо-восточная часть ее находится в подзоне средней тайги, а крайняя юго-западная - в зоне смешанных лесов.

Для рассматриваемой территории наиболее характерны темнохвойные (еловые) леса. Широко распространены заболоченные еловые леса. На более легких песчаных и супесчаных почвах широко распространены сосновые леса, образующие такие же сообщества, как и еловые. Состав лиственных лесов представлен главным образом мелколиственными породами (березой, осиной, ольхой). Всего под лесом находится половина площади Северо-запада.

Средняя температура воздуха на территории Северо-Запада колеблется от 2° в северо-восточной части до 4,5° в южной. Самыми холодными месяцами в году является январь и февраль. Самым теплым месяцем на всей рассматриваемой территории является июль. За начало весны принимается

устойчивый переход средней суточной температуры воздуха через нуль. Весна характеризуется частыми возвратами холодов, а иногда и кратковременным установлением снежного покрова. К концу апреля вся территория освобождается от снежного покрова. В начале лета еще возможны заморозки. Раньше всего заморозки прекращаются на побережьях озер Ильмень, Псковского и Чудского. Осень наступает раньше всего на севере Карелии ( в конце августа ), а в конце первой - начале второй декады сентября на юге Карелии и восточных районах Ленинградской и Новгородской областей. Продолжительность осени около двух месяцев.

Территория Карелии и Северо-Запада относится к зоне избыточного увлажнения. На распределение осадков большое влияние оказывают орографические особенности местности и подстилающая поверхность, ведущие к нарушению плавного характера изменения осадков. Внутри года осадки распределяются неравномерно. Характер их распространения по территории в теплый и холодный период имеет много общего с годовым, однако в теплый период года влияние возвышенностей на перераспределении осадков более заметно, нежели в холодный.

Упругость водяного пара наименьших значений достигает в феврале. Начиная с марта, происходит увеличение влагосодержания воздуха, особенно интенсивное от мая к июлю. Максимальных значений упругость водяного пара достигает в июле. В августе увлажнение начинает понижаться.

Ветровой режим зависит от общей циркуляции атмосферы и тесно связан с особенностями распределения барических центров, расположенных вокруг района. На рассматриваемой территории в течении всего года преобладают ветры южного, юго-западного и западных направлений. Еще в большей степени, чем направление, от местных условий зависит скорость ветра. Наименьшие скорости наблюдаются в районах, где сказывается влияние леса; по мере приближения к крупным водоемам ветер возрастает, и наибольшие величины отмечаются на прибрежных и озерных станциях.

Верхне - Волжский район. Рассматриваемая территория расположена в пределах Русской равнины. Район охватывает бассейн реки Волги до города Чебоксары, большая его часть расположена в лесной зоне и только южная - в лесостепи. На севере граница проходит по водоразделу с бассейном реки Онеги и Северной Двины, на западе - с бассейнами рек Волхова, Западной Двины и Днепра, на востоке - с бассейнами реки Вятки и правобережных притоков реки Волги и на юге - с бассейнами реки Дона.

Поверхность, в общем, равнинных территорий района представляет собой чередование низменных равнин и возвышенностей с колебанием абсолютных отметок в пределах 200 - 300 м. На формирование рельефа большое влияние оказало геологическое строение и тектонические особенности Русской платформы. Основная часть рассматриваемой территории еще в мезозое вступила в стадию континентального развития, в период, когда сформировались крупные элементы рельефа. В западной и юго-западной частях территории, где на поверхность выступают плотные карбонатные породы каменноугольной и девонской систем, простираются Валдайская, Смоленско- Московская, Среднерусская возвышенности, а в юго-восточной части - Приволжская возвышенность. В северной и восточной частях района, сложенных более рыхлыми породами перми и мезозоя, располагаются обширные низменности: Верхневолжская, Ветлужско - Ужинская, Мещерская, Окско - Донская. Описываемая территория не менее четырех раз перекрывалась ледниками, но на формирование рельефа в основном оказала влияние деятельность последних трех ледниковых покровов - днепровского, московского и валдайского. Формы поверхности возникли в результате деятельности ледников.

В соответствии с морфогенетическим принципом геоморфологии, рассматриваемая территория относится к трем провинциям: а) ледниковых холмистых и плоских равнин; б) водно - ледниковых и аллювиальных равнин; в) сильно расчлененных эрозиальных возвышенных равнин.

Провинция ледниковых холмистых и плоских равнин охватывает всю северную часть района, включая бассейн реки Волги до впадения реки Оки, верхней части бассейна реки Москвы и левобережного бассейна реки Клязьмы. Для северо - запада (бассейны рек Мологи, Суды и Шексны ) типично наличие моренных возвышенностей с песчаными холмами и грядами, большое число озер и слабо развитая эрозионная сеть.

Рассматриваемая территория расположена в центральной части кристаллического фундамента Русской платформы, в основном, в пределах Московской впадины, заполнены толщей осадочных пород. Поверхность докембрийского фундамента осложнена множеством структур второго порядка в виде валов и прогибов. Кристаллические породы не выходят на поверхность и залегают на глубине 2500-3000 м. Непосредственно осадочная толща представлена системами нижнего палеозоя, девона, карбона, перми и мезо-кайнозоя. Породы каменноугольной системы широко распространены по всей западной окраине территории. Отложения карбона представлены преимущественно известняками. Пермские отложения встречаются на северо-западе территории. Сменив погружающиеся к востоку каменноугольные отложения, коренные породы, обычно выходят на поверхность по берегам рек, а в междуречье почти повсеместно перекрыты четвертичным чехлом. В северо- западной части района располагается, в основном, карст известняков карбона и гипсовый карст пермских отложений. Карст выражен воронками, оврагами, сухими долинами. Подземными реками; в районе озера Белое встречаются периодически исчезающие озера.

Территория ВерхнеВолжского района расположена в зоне умеренно-континентального климата с холодной зимой и умеренно-теплым летом. Континентальность климата увеличивается с северо-запада на юго- восток. Основные климатические характеристики и их изменение по

территории района определяется влиянием местных и общих факторов: солнечной радиации, циркуляции атмосферы, подстилающей поверхности.

Начало весны определяется устойчивым переходом температуры воздуха через 0°C. Разница в сроках наступления весны в пределах территории не превышает 5-10 дней. В теплый период года температура воздуха повышается с северо-запада на юго-восток. Понижение температуры осенью происходит медленнее, чем повышение ее весной.

Территория ВерхнеВолжского района относится к зоне влажного климата. Средняя многолетняя сумма осадков изменяется по территории и уменьшается с северо-запада на юго-восток. Годовые суммы осадков изменяются во времени в широких пределах. В течении года осадки распределяются неравномерно. Большая их часть выпадает в теплый период года, с апреля по октябрь, с максимумом в июле.

Абсолютная влажность воздуха меняется по территории незначительно. Наибольшая величина абсолютной влажности наблюдается в июле. Относительная влажность изменяется в течении года в широких пределах и имеет довольно большой суточный ход. Средний месячный минимум относительной влажности отмечается в мае.

В теплое время года в связи с усилением меридиональной циркуляции атмосферы увеличивается повторяемость ветров северо-западных, северных и северо-восточных румбов. Средняя годовая скорость ветра в защищенных местах (в городах, на лесных полянах, в понижениях рельефа) составляет 3-3,5 м/с, увеличивается до 4,5-5,8 м/с на более открытых местах. Наибольшая скорость ветра наблюдается зимой и в начале весны, наименьшие - летом.

Донской район. По географическому положению, общему характеру района и геологическому строению территорию Донского района, вытянутую, в основном, в меридиональном направлении, можно разделить на две неравные части: северную и южную. Граница между ними в восточной левобережной части бассейна Дона проходит по Волго-Донскому каналу, в западной правобережной - опускается несколько южнее до параллели 48° (устье реки Цимлы).

Северная, большая по площади, часть района характеризуется сложным, разнообразным рельефом и геологическим строением. Западная его часть здесь занимает все склоны Среднерусской возвышенности. Имея общий слабый наклон на восток. Она крутыми уступами обрывается к долинам рек Воронежа и Дона. Наибольшие абсолютные высоты Среднерусской возвышенности в пределах Донского района находится на западной его границе, на водоразделе с соседними бассейнами Оки и Сейма. К югу возвышенность понижается. На юго-востоке Среднерусской возвышенности переходит в узкую Восточно-Донскую гряду, являющуюся водоразделом между Доном и левыми притоками Северского донца, а также бассейна реки Чир. Между рекой Доном и участком нижнего течения его притока - реки Хопра - находится Калачская возвышенность, в целом представляющая собой плато. Восточная часть бассейна реки Дона расположена в пределах южной половины Приволжской возвышенности. Между Среднерусской, Калачской и Приволжской возвышенностями расположена Окско-Донская низменность, южная половина которой относится к бассейну Дона. В южной части бассейна основная площадь дренируется левыми притоками Дона, стекающих с западных склонов Ергеней и с северных склонов Ставропольской возвышенности.

Рассматриваемая территория расположена в южной части Русской платформы, сложенная в основном кристаллическими породами докембрия, прикрытыми толщей осадочных пород палеозоя, мезозоя и кайнозоя. Кристаллические породы докембрия здесь, как и на всей Русской платформе, представлены гранитами и кристаллическими сланцами. Наибольшее распространение в Донском районе, особенно в средней и северной его частях, получили отложения меловой системы, всюду выходящие на поверхность по склонам речных долин, балок и оврагов. Отложения неогена на территории Донского района имеют наиболее разносторонний ареал. Литологически эти отложения представлены песчано-глинистыми породами, преимущественно континентального происхождения. Самые молодые отложения четвертичного

периода почти сплошь прикрывают все более ранние и отличаются большим разнообразием, как в генетическом, так и в литологическом отношении.

В пределах района расположены три ландшафтных зоны: лесостепная, степная и полупустынная.

Климат Донского района формируется под влиянием радиации, циркуляции и подстилающей поверхности. По географическому положению рассматриваемая территория находится под воздействием различных по физическим свойствам и происхождению воздушных масс: холодных из Арктики, морских с Атлантики, сухих из Казахстана, тропических со Средиземноморского бассейна.

На термический режим воздействуют, помимо основных факторов - атмосферной циркуляции и радиации, также местные факторы: мезо и микрорельеф, растительность, почва, близость водоемов, застроенность территории. Благодаря их воздействию температурные условия могут существенно меняться на расстоянии сотен метров, а иногда и нескольких километров.

Весна наступает на юге бассейна в первой декаде марта и продвигается на север, в средней части бассейна приходит 20-25 марта, а в северной только в начале апреля. Заморозки и возврат холодов еще возможны, но нарастание температуры идет интенсивно, вызывая просыхание и прогрев почвы. Лето жаркое, сухое, продолжительность лета увеличивается с севера на юг и составляет 100—140 дней. С наступлением осени (за ее начало принята дата перехода средней суточной температуры через 15°) температура воздуха и почвы понижается. Осенние процессы протекают несколько медленнее, чем весенние.

Атмосферные осадки играют существенную роль в гидрологическом режиме и, в частности, в процессе формирования стока рек. Осадкам свойственна большая изменчивость во времени и по площади. В годовом ходе осадков их максимум наблюдается летом.



Влажность воздуха характеризуется упругостью водяного пара, относительной влажностью и недостатком насыщения водяным паром. Упругость водяного пара на территории рассматриваемого бассейна по средним годовым данным изменяется с юго-запада на северо-восток от 10 до 6 мб; наибольших значений она достигает летом. Относительная влажность воздуха за год изменяется слабо, в пределах 70 - 76 %.

На территории Донского района средняя годовая скорость ветра увеличивается с востока на запад от 3,5 до 5,5 м/сек. Летом скорость ветра меньше, чем зимой, на севере бассейна в основном в западной половине, на юге - в восточной. В августе скорости ветра наименьшие в году.

### **3.2 Расчет испарения с поверхности водоемов**

Расчет испарения с поверхности водоемов производился в следующей последовательности. Сначала по средним годовым данным прибрежных метеостанций за теплый период года, отдельно за каждый месяц, отдельно для каждого водоема производится расчет испарения по формуле ГГИ (16). Затем полученные результаты умножаются на соответствующие коэффициенты из таблиц предыдущего раздела и получаются оценки испарения по формулам Браславского, Шуляковского и других авторов.

Данные таблиц (8 - 12) показывают, что величина  $\Delta\theta$  на озерах Ладожское и Онежское в первые три месяца теплого периода ( май - июль ) имеет отрицательное значение, в остальные месяцы эта величина положительная. На других водоемах она положительна всегда, т.е. поверхность воды в среднем за все месяцы теплого периода теплее воздуха на уровне 2 м от поверхности воды. Это означает, что для этих водоемов в формулах Браславского и Шуляковского добавки в коэффициентах обмена положительны во все месяцы теплого периода. На озерах Ладожское и Онежское эти добавки отрицательны в первую половину и положительны во вторую половину теплого периода.

Таблица 3.1 - Исходные данные для расчета испарения с водной поверхности

Ладожского озера

	месяц						сумма
	V	VI	VII	VIII	IX	X	
$e_2$ , гПа	7,2	10,8	14,0	13,7	10,4	7,2	
Цф, м/с	3,5	3,4	3,2	2,8	3,2	3,7	
$t^{\circ}\text{C}_{\text{ЛВ}}$	8,0	13,5	16,9	15,0	9,5	3,7	
$t^{\circ}\text{C}$	6,8	9,9	15,6	15,7	11,7	7,5	
АО, $^{\circ}\text{C}$	-1,2	-3,6	-1,3	0,7	2,2	3,8	
$e_0$ , гПа	9,9	12,2	17,7	17,8	13,8	10,4	
$u_2$ , м/с	4,6	4,4	4,2	3,6	4,2	4,8	
$e_2$ , гПа	7,5	10,3	14,1	13,9	10,7	7,7	
$E$ , мм/м ЭС	44	33	63	61	52	52	305

Таблица 3.2 - Исходные данные для расчета испарения с водной поверхности

Онежского озера

	месяц						сумма
	V	VI	VII	VIII	IX	X	
$e_2$ , гПа	6,9	11,1	14,2	14,0	10,4	7,0	
$u_{\text{ф}}$ , м/с	4,4	4,4	3,9	3,8	4,6	5,3	
$t^{\circ}\text{C}$	7,3	13,0	16,3	14,3	9,4	3,4	
$t^{\circ}\text{C}$	2,9	9,9	14,2	14,9	11,3	5,5	
АО, $^{\circ}\text{C}$	-4 4	-3,1	-2,1	0,6	1,9	2,1	
$e_0$ , гПа	7, 5	12,2	16,2	17,0	13,4	9,0	
$u_2$ , м 'с	5, 7	5,7	5,1	4,9	6,0	6,9	
$e_2$ , гПа	6,- 4	10,5	13,7	13,8	10,5	7,1	
$E$ , мм/мес	2' 1	36	51	63	64	49	288

Таблица 3.3 - Исходные данные для расчета испарения с водной поверхности  
озера Ильмень

	месяц						сумма
	V	VI	VII	VIII	IX	X	
e <sub>2</sub> , гПа	9,0	12,7	15,5	14,8	10,9	7,6	
и <sub>ф</sub> , м/с	4,1	3,9	3,5	3,7	4,0	4,6	
t °С	10,5	15,2	17,7	15,7	10,4	4,3	
tn, °С	15,8	18,0	20,6	17,1	10,8	8,7	
ДО, °С	5,3	2,8	2,9	1,4	0,4	4,4	
e <sub>0</sub> , гПа	18,0	20,6	24,3	19,5	13,0	11,2	
и <sub>2</sub> , м/с	4,5	4,3	3,9	4,1	4,4	5,1	
e <sub>2</sub> , гПа	11,4	14,0	16,8	15,1	10,7	8,2	
E, мм/мес	121	114	122	76	40	60	532

Таблица 3.4 - Исходные данные для расчета испарения с водной поверхности  
озера Белое

	месяц						сумма
	V	VI	VII	VIII	IX	X	
e <sub>2</sub> , гПа	7,7	11,9	14,8	13,9	9,9	6,7	
и <sub>ф</sub> , м/с	4,0	4,9	4,5	4,2	5,1	5,4	
t °С	9,0	14,7	17,2	15,1	9,2	2,6	
tn, °С	9,1	16,5	18,6	17,0	10,8	4,4	
ДО, °С	0,1	1,8	1,4	1,9	1,6	1,8	
e <sub>0</sub> , гПа	11,€	18,8	21,4	19,4	13,0	8,4	
и <sub>2</sub> , м/с	4,4	5,4	5,0	4,6	5,6	5,9	
e <sub>2</sub> , гПа	8,2	13,0	15,6	14,5	10,1	6,7	
E, мм/мес	61	120	115	93	62	39	490

Таблица 3.5 - Исходные данные для расчета испарения с водной поверхности  
Цимлянского водохранилища

	месяц						сумма
	V	VI	VII	VIII	IX	X	
$e_2$ , гПа	10,6	13,4	14,6	14,0	10,4	7,8	
$и_{ф}$ , м/с	4,0	3,6	3,4	3,3	3,4	3,8	
$t$ °С	16,6	20,6	23,6	22,5	15,9	8,0	
$t_{,,}$ °С	16,7	21,7	23,9	22,8	17,2	10,1	
АО, °С	0,1	1,1	0,3	0,3	1,3	2,1	
$e_0$ , гПа	19,0	26,0	29,7	27,8	19,6	12,4	
$ц_2$ , м/с	4,4	4,0	3,7	3,6	3,7	4,2	
$e_2$ , гПа	11,9	15,5	17,2	16,3	11,9	8,4	
$E$ , мм/м <sup>5</sup> С	129	170	201	174	124	67	865

Сравним результаты испарения вычисленного по формуле ГГИ, с результатами, которые были бы получены по формулам других авторов, для этого воспользуемся таблицами 5,6,7 и 8. Результаты расчета по всем рассматриваемым формулам приведены в таблицах (3.6-3.10). Оценки испарения были, сделаны за каждый месяц и весь теплый период. Данные таблиц 3.5-3.9) показывают, что формулы Константинова и Лайхтмана дают во все месяцы теплого периода на всех рассматриваемых объектах значения испарения меньше, чем формула ГГИ, принятая нами за основную. Формулы Шуляковского и Браславского на озерах Белое и Ильмень и на Цимлянском водохранилище дают во все месяцы значения испарения большие, чем формула

ГГИ. Для озер Ладожское и Онежское последние формулы в первые три месяца дают несколько приуменьшенные значения, а в последние три месяца

теплого периода года преувеличенные значения испарения по сравнению с формулой ГГИ.

Таблица 3.6 - Испарение с поверхности Ладожского озера по формулам различных авторов

месяц	Расчёт испарения по формулам различных авторов				
	ГГИ	Шуляковский	Константинов	Браславский	Лайхтман
V	44	42	33	47	40
VI	33	28	26	32	30
VII	63	58	48	65	55
VIII	61	76	43	67	52
IX	52	69	37	61	46
X	52	70	39	63	48
сумма	305	343	223	336	271

Таблица 3.7- Испарение с поверхности Онежского озера по формулам различных авторов

месяц	Расчет испарения по формулам различных авторов				
	ГГИ	Шуляковский	Константинов	Браславский	Лайхтман
V	24	21	20	24	23
VI	36	33	30	37	34
VII	51	45	41	52	47
VIII	63	75	49	69	59
IX	64	82	51	74	61
X	49	59	40	56	49
сумма	288	315	231	312	273

Таблица 3.8 - Испарение с водной поверхности озера Белое по формулам  
различных авторов

месяц	Расчет испарения по формулам различных авторов				
	ГГИ	Шуляковский	Константинов	Браславский	Лайхтман
V	61	72	41	67	55
VI	120	151	85	137	113
VII	115	146	82	131	107
VIII	93	119	64	105	84
IX	62	77	44	69	59
X	39	49	28	44	37
сумма	490	614	344	553	455

Таблица 3.9 - Испарение с поверхности озера Ильмень по формулам  
различных авторов

месяц	Расчет испарения по формулам различных авторов				
	ГГИ	Шуляковский	Константинов	Браславский	Лайхтман
V	121	167	89	152	110
VI	114	151	80	134	103
VII	122	16?	86	148	106
VIII	76	97	51	86	67
IX	40	49	27	44	36
X	60	81	45	73	56
сумма	532	714	378	637	478

Таблица 3.10 - Испарение с поверхности Цимлянского водохранилища по формулам различных авторов

месяц	Расчет испарения по формулам различных авторов				
	ГГИ	Пуляковский	Константинов	Браславский	Лайхтман
V	129	151	86	140	116
VI	170	219	115	193	150
VII	199	243	128	218	173
VIII	174	220	115	197	148
IX	124	154	79	135	107
X	67	92	48	81	60
сумма	863	1079	571	964	754

В таблице 3.11 приведены результаты сравнения (в %) значений испарения по формулам различных авторов и формуле ГГИ, за весь теплый период по всем рассмотренным водоемам. Данные таблицы 3.12 показывают, что наибольшие значения испарения, на всех водных объектах, дает формула Шуляковского, а наименьшие - формула Константинова. Можно сказать, что формула Константинова дает занижение значений испарения по сравнению с формулой ГГИ, примерно на 30%, а формула Лайхтмана, примерно на 10%. Формулы Шуляковского и Браславского самое большое завышение дали для мелководного озера Ильмень.

Таблица 3.11 - Сравнение результатов расчета испарения с поверхности водоемов за теплый период по формулам различных авторов и формуле ГГИ, (%)

Водоем	Автор			
	Шуляковский	Браславский	Константинов	Лайхтман
Ладожское оз.	112	ПО	73	89
Онежское оз.	109	108	80	94
Белое оз.	125	113	70	93
Ильмень оз.	134	119	68	89
Цимлянское вдхр.	124	111	66	87

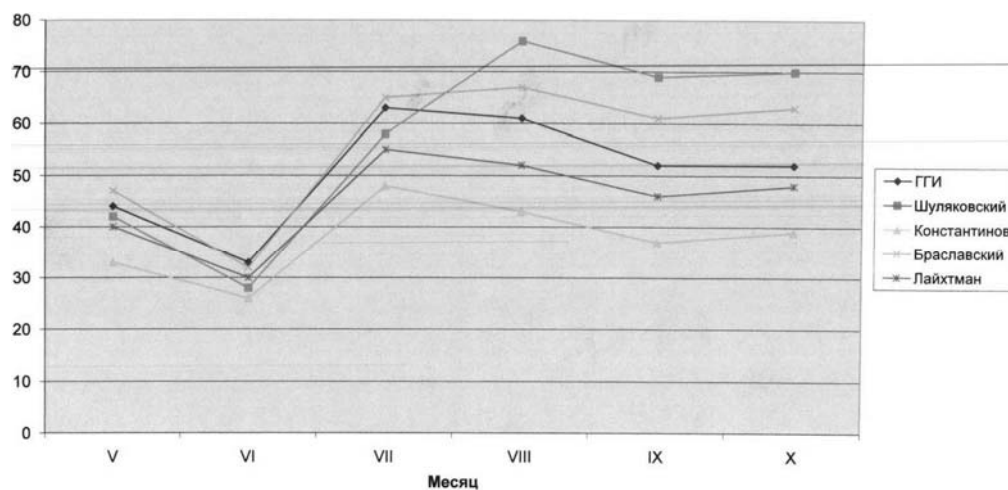


Рис. 3.1 - График расчета испарения с поверхности Ладожского озера по формулам различных авторов

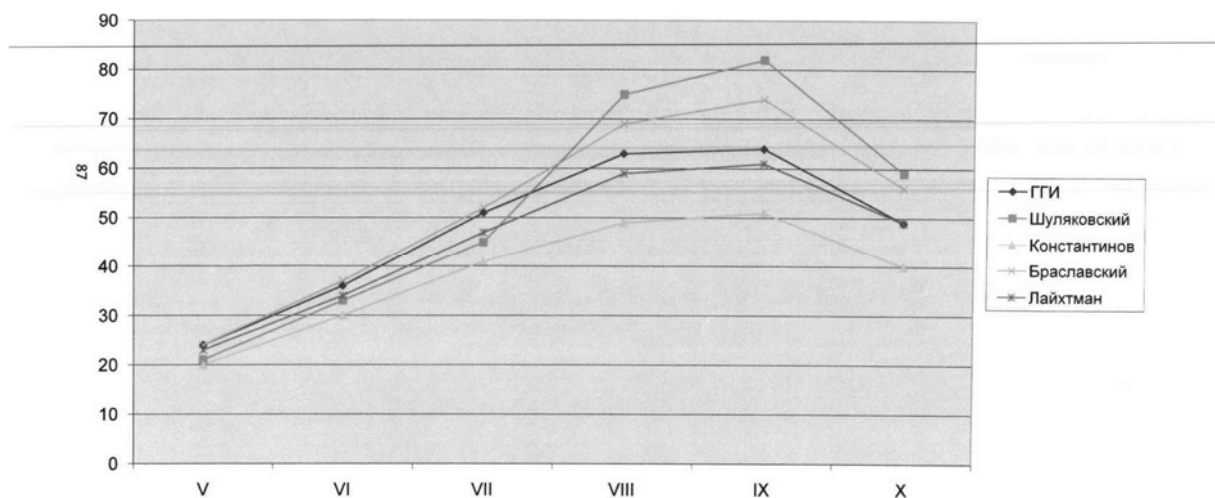




Рис. 3.2. - График расчета испарения с поверхности Онежского озера по формулам различных авторов

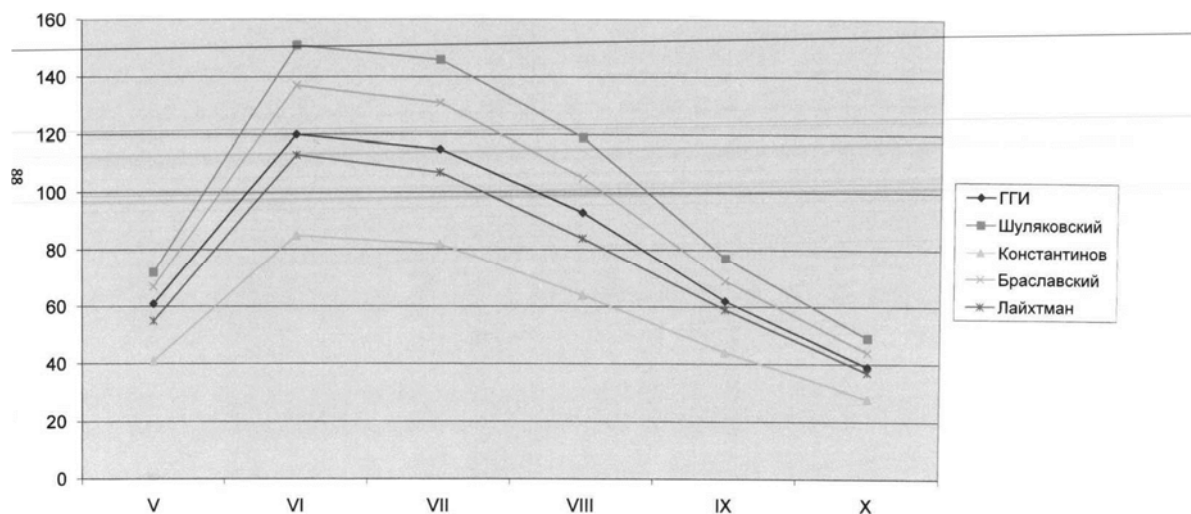


Рис. 3.3 - График расчета испарения с поверхности озера Белое по формулам различных авторов

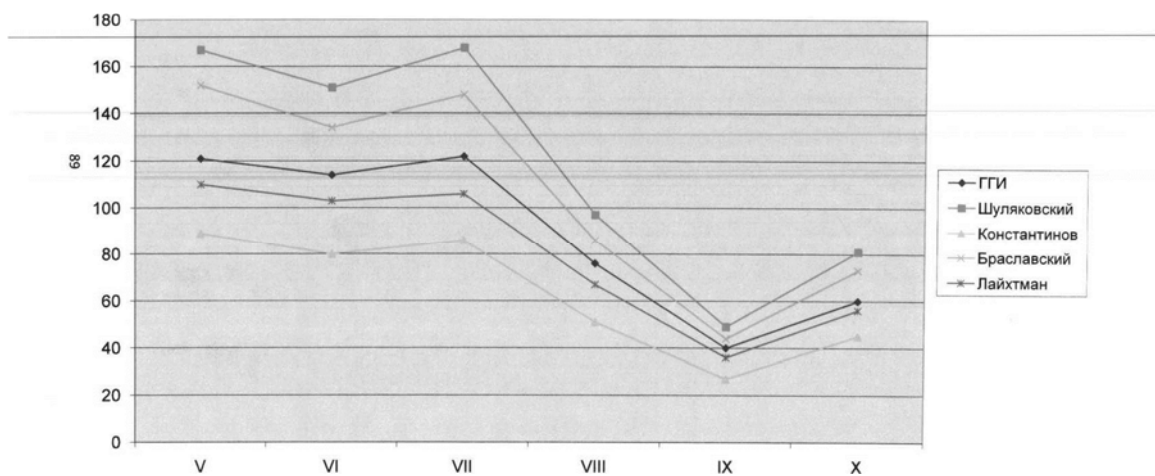


Рис. 3.4 - График расчета испарения с поверхности озера Ильмень по формулам различных авторов

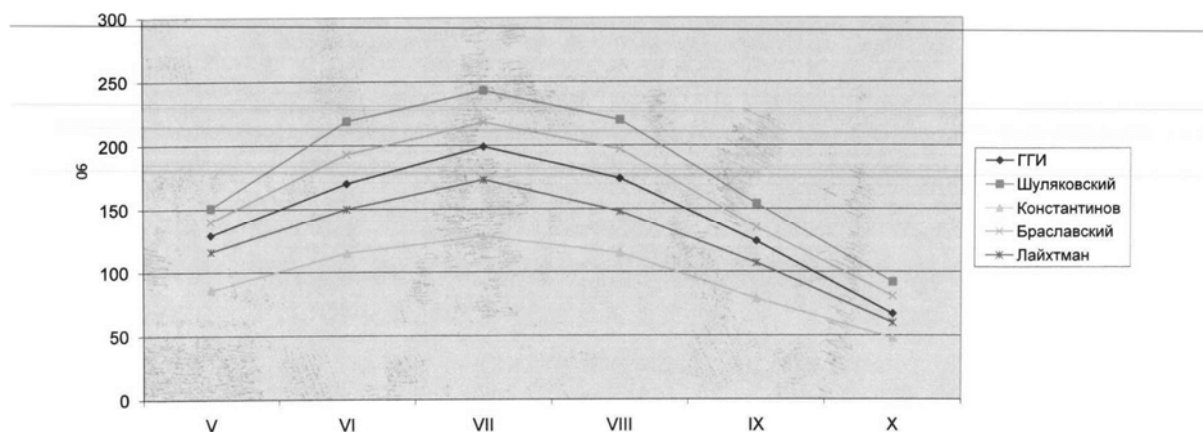


Рис. 3.5 - График расчета испарения с поверхности Цимляского водохранилища по формулам различных авторов

### Заключение

Среди довольно многочисленных методов расчета испарения с водной поверхности, метод расчета по эмпирическим формулам применяется наиболее часто. Это связано с тем, что при расчетах по эмпирическим формулам используются данные наблюдений на сетевых метеостанциях, в то время, как другие методы (теплогового и водного балансов, метод турбулентной диффузии) требуют проведения специальных исследований и оценок трудноопределимых гидрометеорологических величин.

В настоящее время известно довольно много формул различных авторов. В работе предпринята попытка разработки способа сравнения результатов расчета испарения по ряду наиболее известных формул, не прибегая каждый раз к расчету по всем им.

Результатом проделанной работы являются полученные графики и таблицы, с помощью которых можно определить, какие результаты дадут исследуемые нами эмпирические формулы. А также получить представление о том, на сколько результаты расчетов испарения по формулам (18) - (20) и (26) будут отличаться не только от результатов расчетов испарения по формуле ГГИ (16), но и друг от друга. При наличии таких таблиц достаточно рассчитать

интересующую нас величину испарения по формуле ГГИ. И затем, пользуясь коэффициентами перехода, определить испарение по формулам других авторов. Чтобы сравнить относительные расхождения в оценках испарения по формулам различных авторов, достаточно рассмотреть отношение соответствующих коэффициентов «n». Например, при заданных значениях  $\Delta\theta$  и  $u_2$ , отношение  $n_{21}/n_{41}$  покажет на сколько формула Браславского завьсит или занизит испарение по сравнению с формулой Константинова.

Результаты сравнения формул ГГИ, А.П Браславского и С.Н. Нургалиева, Л.Г. Шуляковского, А.Р. Константинова, Лайхтмана и Тимофеева показывают, что наиболее близкие результаты расчета испарения с водной поверхности, по сравнению с формулой ГГИ, дает формула Браславского и Нургалиева, особенно при устойчивой стратификации, когда расхождения не превышают 5 —10 %. Наибольшие значения испарения на всех водных объектах дает формула Шуляковского, а наименьшие - Константинова. Можно сказать, что формула Константинова дает занижение значений испарения по сравнению с формулой ГГИ, примерно, на 30%, а формула Лайхтмана и Тимофеева, примерно, на 10%.

Представляется, что полученные результаты могут оказаться полезными в практике воднобаласовых исследований на озерах и водохранилищах.

## Список литературы

1. Винников С.Д., Викторова Н.В. Физика вод суши. Санкт-Петербург.2009.  
420 с.
2. Викулина З. А. Водный баланс озер и водохранилищ Советского Союза. -  
Л.: Гидрометеиздат,1979.
3. Константинов А.Р. Испарение в природе. -Л.: Гидрометеиздат, 1968. -  
532с.
- 4.Кириллова Т.В. Радиационный режим озер и водохранилищ. – Л.:  
Гидрометеиздат, 1970.
5. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши.  
– Л.:  
Гидрометеиздат, 1985.
6. Методы изучения и расчета водного баланса — Л.: Гидрометеиздат,  
1981. - 398 с.
7. Мишон В.М. Практическая гидрофизика – Л, Гидрометеиздат, 1983.  
- 176с.
8. . Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 7,  
Часть II. Наблюдения за испарением с водной поверхности – Л.:  
Гидрометеиздат, 1985. - 104 с.
9. Постников А. Н. Приближенный метод оценки испарения с озер и  
водохранилищ // Уч. зап. РГГМУ, 2010, № 13,с. 21-29.
5. Постников А.Н. Оценка норм испарения за безледоставный период с  
озер и  
водохранилищ России и отдельных стран СНГ методом теплового  
баланса //  
Уч. зап. РГГМУ, 2012, № 26, с.25-33.  
водохранилищ. – Л.: Гидрометеиздат, 1989.

