



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

Кафедра гидрометрии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему

**Анализ моделей вычисления
расходов воды
при экспресс-измерениях**

Исполнитель Сергун Анна Александровна
(фамилия, имя, отчество)

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

Субботина Елена Сергеевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

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

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

« 20 » мая 20 16 г.

Санкт-Петербург
2016

СОДЕРЖАНИЕ

Сокращения	3
Введение	4
1 Современное состояние вопроса и основное направление исследований	11
2 Стандартная линейно – детерминированная модель расхода воды	16
2.1 Метод «скорость – площадь»	16
2.2 Развитие моделей расходов воды и способов его измерений методом «скорость – площадь»	20
3 Линейные интерполяционно – гидравлические модели расхода воды	26
3.1 Линейная интерполяционно – гидравлическая модель расхода воды	26
3.2 Упрощенная интерполяционно – гидравлическая модель расхода воды	34
3.3 Корреляционно – гидравлическая модель расхода воды	37
3.4 Вероятностно – гидравлическая модель расхода воды	41
4 Расчетная методика и результаты вычислений	44
4.1 Анализ исходных данных	44
4.2 Описание водомерного поста р. Пяку – Пур	46
4.3 Методика расчета расходов воды по интерполяционно – гидравлическим моделям	49
Анализ результатов	55
Выводы	56
Список использованных источников	58
Приложение А – Результаты расчетов расходов воды по ЛД и ЛИГ – моделям и их погрешности р. Пяку – Пур – г. Тарко – Сале	60

СОКРАЩЕНИЯ

- ГП – Гидрологический пост
- ЛД – Линейно – детерминированная модель
- ЛИГ – Линейно-интерполяционно – гидравлической
- ГГИ – Государственный Гидрологический Институт
- УИГ – Упрощенная интерполяционно – гидравлическая модель
- КРГ – Корреляционно – гидравлическая модель
- ВРГ – Вероятностно – гидравлическая модель
- ГД – Гидравлически детерминированная модель

ВВЕДЕНИЕ

Первые начатки гидрологии появились на заре истории человечества, около 6000 лет назад, в Древнем Египте. В то время когда на территории современных Финляндии и Карелии, возможно, кое-где еще таяли остатки льдов последнего периода оледенения, египетские жрецы вели простейшие гидрологические наблюдения – отмечали на скалах в 400 км выше Асуана уровни воды в периоды ежегодных разливов Нила. Позднее в Древнем Египте была создана целая сеть (около 30) «гидрологических» постов на Нижнем Ниле, так называемых ниломеров. Некоторые ниломеры представляли собой богатые архитектурные сооружения: мраморные колодцы в русле реки с красиво украшенной каменной колонной посередине, на которой отмечали высоту подъема половодья. Сохранился самый длительный в мире ряд гидрологических наблюдений – за 1250 лет – по одному из таких ниломеров, расположенному на острове Рода близ Каира.

По высоте уровня воды во время половодья Нила жрецы определяли будущий урожай и заблаговременно назначали налоги.

Однако понадобилось несколько тысячелетий для того, чтобы гидрология, начавшаяся с наблюдений за половодьем Нила, превратилась в самостоятельную научную дисциплину. Важным рубежом в истории развития гидрологии стал конец 17 в. Французский ученый П. Перро, а после него Э. Мариотт, измерив величину осадков и стока в бассейне Верхней Сены, установили количественные соотношения главных элементов водного баланса речного бассейна – осадков и стока, опровергнув господствовавшие в то время фантастические представления происхождения рек, источников и подземных вод. В этот же период английский астроном Э. Галлей на основании опытов по измерению испарения показал на примере Средиземного моря, что испарение с поверхности моря значительно превышает приток речных вод в него, и тем самым «замкнул» схему круговорота воды на земном шаре.

Гидрологическая наблюдательная сеть России – одна из старейших в мире. Визуальные наблюдения над уровнем воды в Неве начались ещё с постройки Санкт-Петербурга по указу Петра I. Первый организованный гидрологический пост был открыт в 1851 году на Неве в деревне Ново-Саратовке. Массово гидрологические посты (ГП) начали открываться в 1970-90-х гг. на таких крупных судоходных реках как Волга, Ока, Северная Двина, Днепр, Десна, Дон. Старейший ГП Московской области – Кашира на Оке – начал действовать с апреля 1877 года. Вторая волна развития наблюдательной гидрологической сети пришлась на 20-40 гг. 20 века и была связана с индустриализацией. К 1941 году на территории СССР функционировало 4463 ГП. Во время Великой Отечественной Войны большинство ГП продолжало работать, и даже открывались новые посты. Например, пост в Коломне на реке Москва был открыт на месте важнейшей переправы в 1942 году. Война внесла коррективы и в программу работ. В регулярные наблюдения вошло измерение толщины льда на всех реках с устойчивым ледоставом. Следующий этап развития приходится на послевоенный период с конца 1940-х гг. по 1970-е гг., когда было открыто большинство действующих ГП. Со второй половины 70-х годов началась оптимизация гидрологической наблюдательной сети, и некоторые посты были закрыты или законсервированы. Со второй половины 90-х годов закрытие постов происходило в связи с отсутствием финансирования.

Гидрологические наблюдения по состоянию на 31.12.2013 проводились на 3045 постах, из которых 2698 вели наблюдения на реках и 347 – на озёрах и водохранилищах. Из этого количества 2129 пост – информационные (в том числе 1895 на реках и 234 на озёрах и водохранилищах). Сток воды измерялся на 2147 постах, сток наносов – на 637 постах. Количество реперных, основных и дополнительных постов составляло, соответственно, 1272, 1434 и 339.

Количество гидрологических постов на реках, озёрах и водохранилищах сократилось по сравнению с 2012 годом на 26 постов, из которых 21 речной и пять озёрных.

Однако настоящая плотность наблюдательной сети существенно ниже плотности, рекомендуемой Всемирной Метеорологической организацией (ВМО). ГП не хватает для надежного прогнозирования водного режима рек. Кроме этого более 10% ГП работают временно или по сокращенной программе наблюдений по причине отсутствия наблюдателя, разрушения постовых устройств или нехватки приборов. Нехватка ГП связана и с ростом числа потребителей гидрологической информации, особенно в районах с активным строительством.

Состав и техническое состояние средств измерения вызывает большие опасения. 80 – 90% приборов выработали технический ресурс и не подлежат модернизации. Практически все приборы морально устарели и неоднократно выработали свой ресурс, а имевшиеся в наличии было невозможно отремонтировать из-за отсутствия запчастей. Всё это влекло за собой срывы наблюдений за стоком и уровнем воды.

Возникают проблемы и в области организации сбора информации. Как известно, наблюдения на ГП проводятся два раза в сутки в 08 и 20 часов местного времени или при резком подъёме уровня воды учащенно.

Данные наблюдений заносятся наблюдателем в специальную водомерную книжку, которая в конце месяца высылается по почте на гидрологическую станцию, где проводится первичная обработка информации. Некоторые ГП передают данные оперативно по мобильной связи в службу сбора данных. Ручная запись больших объемов информации, пересылка водомерных книжек по почте существенно замедляют процесс сбора информации.

Было принято решение о создании современной системы наблюдений, которая:

- 1) повысила бы уровень безопасности населения, особенно в паводкоопасных районах;

2) улучшила бы качество гидрологической информации, представляемой потребителям;

3) использовала бы новые технологии сбора данных наблюдений.

Для этого необходимо:

- оптимизировать состав, пространственное разрешение и программу работ ГП с учётом необходимости увеличения численности наблюдательной сети;
- повысить точность наблюдений и уровень надёжности поступления оперативной информации путем внедрения современных средств наблюдения, приборов и средств связи;
- разработать и внедрить современные методы и технологии обработки оперативной информации для улучшения прогнозирования показателей гидрологического режима рек.

В настоящее время на гидрологических постах проводятся следующие наблюдения и работы.

Наблюдения:

- за уровнями воды;
- за температурой воды;
- за явлениями ледового режима (визуально);
- за толщиной льда, шуги и высотой снега на льду;
- за распространением водной растительности (визуально);
- за уклоном водной поверхности;
- за метеорологическими характеристиками (по программе дополнительных работ).

Работы:

- измерение расходов воды;
- измерение расходов взвешенных наносов;
- отбор единичных проб воды на мутность;

- отбор проб воды для определения гранулометрического состава взвешенных наносов;
- отбор проб грунта для определения гранулометрического состав донных наносов;
- отбор проб для определения химического состава.

К одним из наиболее важных относятся наблюдения за уровнями и температурой воды, а также измерение расходов воды.

В настоящее время измерение расхода воды выполняется с помощью гидрометрической вертушки и занимает от 1 – 2 часов на малых реках до 6 – 8 часов на крупных реках. Перед началом работ необходимо определить створ, в котором будут проводиться измерения. Он должен быть строго перпендикулярен течению реки. После назначения створа можно переходить к измерению глубин. Оно выполняется штангой наметкой или прикрепленным к лебедке гидрометрическим грузом. На основании промеров глубин строится поперечный профиль русла, и назначаются вертикали, где будут измеряться скорости течения. Они должны выбираться примерно через равное расстояние и совпадать с местами резкого изменения глубины. Затем гидрометрической вертушкой, закрепленной на штанге или лебедке, измеряются скорости потока. Вертушка устроена таким образом, что при вращении лопастей через определенное количество оборотов замыкается контакт и издается звуковой сигнал. Таким образом, по звонкам подсчитывается количество оборотов за минуту и определяется скорость течения. На каждой вертикали скорость измеряется в нескольких точках. Количество точек определяется глубиной потока на скоростной вертикали и способом измерения расхода воды. Затем проводят вычисления расхода воды. Для каждой вертикали определяют среднюю скорость. Далее рассчитывается площадь водного сечения и средняя скорость между вертикалями. По их произведению определяется частичный расход воды в отсеках между вертикалями. Расход воды есть сумма частичных расходов. Измерения расходов гидрометрической вертушкой в половодье,

когда в реке проходит большой объём воды, не только трудно физически, но и опасно для специалиста-гидролога.

Для ускорения и упрощения проведения полевых гидрологических работ на гидрологическую сеть в настоящее время поставляются мобильные гидрологические лаборатории. Они позволяют, выехав на место, оперативно и максимально точно произвести необходимые измерения. В состав лаборатории входят средства измерения расхода воды, средства для высотной геодезической привязки, средства для измерения гидрохимических характеристик, оборудование для ремонта и восстановления инженерного обеспечения постов, средства жизнеобеспечения и связи.

В последние годы все большее внимание уделяется мероприятиям по охране окружающей среды, рационального использования и учёта всех видов земных ресурсов, в том числе и водных. Учёт водных ресурсов является одной из предпосылок их рационального использования. Важная роль в этом вопросе возложена на автоматические системы управления водохозяйственными комплексами. Одним из главных элементов информационного обеспечения планирования и использования водных ресурсов и управления водохозяйственными системами являются данные о расходах воды. Нам известны многие способы измерения расхода воды, на сети, как правило, используются стандартные способы измерения расхода воды методом «скорость-площадь», который в то же время имеет ряд существенных недостатков и прежде всего, сравнительно малую точность в условиях резко неустановившегося движения. Кроме того, состав измеренных элементов часто обладает избыточной информативностью, а следовательно, требует излишне трудоемких измерений. Этим и определяется актуальность исследований по совершенствованию методики измерений расхода воды, на основе комплексного учета влияющих факторов с привлечением современных методов речной гидравлики, метрологии, теории случайных функций и других смежных дисциплин. Современные требования по информационно-гидрологическому обеспечению народного хозяйства обуславливают совершенствование методик

и моделей измерения расходов воды в направлении снижения продолжительности и трудоемкости процесса измерений. Самый простой и доступный прием ускорения измерений состоит в уменьшении количества скоростных вертикалей без изменения состава и детальности измерений, сопровождающих измерения скоростей течения. При этом ставится условие, чтобы погрешность измерения расхода воды не превышала допустимую. Сохранить заданную точность при уменьшении дискретизации скоростного поля потока позволяют современные специально разработанные для экспресс-измерений модели вычисления расхода воды. Цель настоящей работы заключается в том, чтобы оптимизировать применение наиболее распространенного метода «скорость-площадь» с учетом особенностей кинематической структуры потока и его гидравлических характеристик для выбранных нами рек. При достижении наивыгоднейшего соответствия точности получаемых данных и трудоемкости измерений задача усовершенствования методики измерения расхода воды может считаться решенной. Это решение кроме методического имеет ещё и общее социальное значение, поскольку приводит к повышению производительности труда наблюдателей.

В 1989 году вышел руководящий документ РД 52.08.163-88 (Дополнение к наставлению гидрологическим станциям и постам, выпуск 6 часть1), где для экспресс измерений на сети рекомендуют интерполяционно-гидравлические модели расхода воды.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОСНОВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

В последние годы проблема усовершенствования измерений расхода воды стоит особенно остро в связи с массовым характером измерений, многие из которых выполняются в неблагоприятных условиях. Усовершенствованию измерений расхода воды и его элементов посвящена обширная литература как у нас в стране (разработки Браславского А.П., Железнякова Т.В., Проскурякова А.К., Глушкова В.Г. и других авторов [5,6]), так и за рубежом. Эта проблема возникла уже на начальном этапе развития речной гидрометрии применительно к двум основным требованиям – повышению точности получаемых результатов и снижению трудоемкости измерительного процесса. В литературе более широко распространен вопрос оптимизации измерений лишь по критерию их точности.

По своему характеру погрешности измерений бывают систематическими (повторяющимися по величине и по знаку при идентичных условиях измерений) и случайными (характер их связи с условиями измерений можно лишь определить на статистической основе). Выделяют еще погрешность инструментальную, методическую и погрешность гипотезы [13]. Погрешность гипотезы отражает не соответствие принятой математической модели измеряемой величины и натуры. Например: применительно к стандартным способам определения расхода воды [13] погрешность гипотезы обуславливается линейным представлением изменения скорости потока по ширине частных отсеков.

Кроме того, выделяют основную и дополнительную погрешности: первая проявляется при нормальных условиях измерений, вторая при отклонении условий измерения от нормы [14].

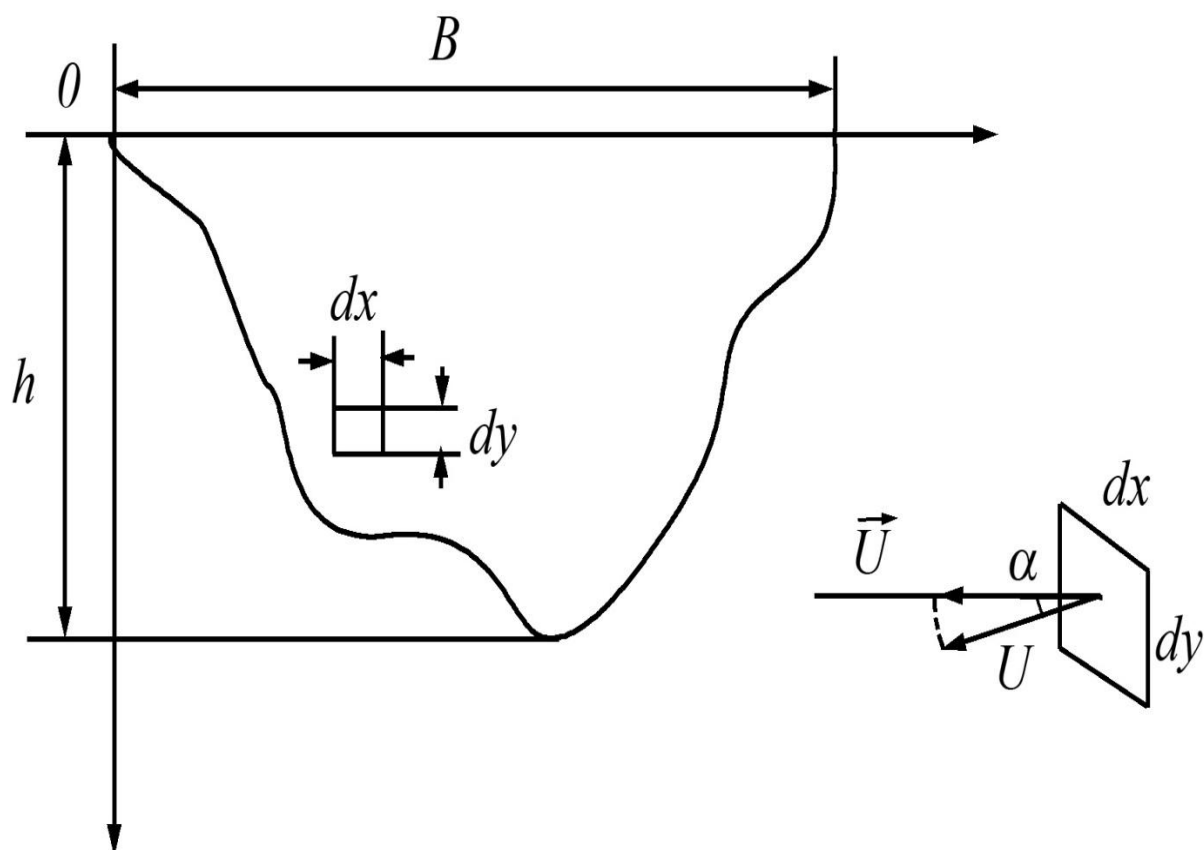


Рисунок 1.1 – Поперечное сечение потока
(U – вектор скорости; α – угол между нормалью и вектором скорости)

В современной гидрометрии метод «скорость – площадь» является аналитической основой измерений расхода воды, он и сейчас не уступает вновь созданным методам (рисунок 1.1).

Для измерения скорости потока наиболее распространенным инструментом остается гидрометрическая вертушка. Хотя сейчас созданы более совершенные средства измерения скорости течения воды, такие как, электромагнитный, ультразвуковой и другие, но все же гидрометрическая вертушка остается достаточно простой, надежной и удобной в обращении. Созданный в 1988 году ИСТ (Измеритель Скорости Течения), который должен был на сети заменить вертушку ГР – 21, ГР – 21М в качестве преобразователя скорости в последовательность электрических импульсов использует гидрологическую вертушку ВГ – 1 – 120/70.

В настоящее время на смену гидрометрическим вертушкам приходят новые современные приборы, к которым относятся профилографы. Существует несколько видов профилографов (Stream Pro, Rio Grande, River Ray и другие). С помощью их выполняют тот же объем работ в течение очень короткого времени, и не требуется трудоемкой обработки информации после проведения полевых работ.

На сети гидрологических постов Росгидромета с помощью профилографов выполняются измерения расходов воды на реках и каналах при производстве инженерно – гидрометеорологических изысканий. Государственным гидрологическим институтом разработаны рекомендации для работы с профилографом применительно к рекам. Периодическая поверка профилографов организована в ГГИ.

Профилографы также позволяют:

- 1) проводить паводочные работы в полном объеме на больших и средних реках;
- 2) измерять расходы воды на высоких уровнях, близких к историческим максимумам, которые очень долгое время не подтверждались измеренными расходами воды с середины прошлого века.

Управление Ямало – Ненецкий ЦГМС – филиала ФГБУ «Обь – Иртышское УГМС» в свое время было снабжено одним профилографом Rio Grande, но, к сожалению, на наблюдательную сеть прибор так и не был поставлен (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 - Профилограф Rio Grande

Существенным недостатком стандартных измерений расходов воды является их большая трудоемкость даже в условиях установившегося режима течения, а в условиях не стационарности потока значительное возрастание погрешности измерений. Этим объясняется актуальность дальнейших усовершенствований метода «скорость – площадь» с использованием гидрометрической вертушки, в качестве измерителя скорости потока, с тем, чтобы сократить затраты времени на измерения расходов воды без существенного снижения точности получаемых результатов.

Как известно, одним из основных элементов расхода воды является средняя скорость на вертикали. Средняя скорость чаще всего определяется по данным измерений скоростей течения в отдельных точках. Разработаны квадратурные формулы для расчета средней скорости на вертикали вида:

$$\bar{U} = \sum_i^n a_i \cdot U_i, \quad (1.1)$$

где a_i – весовой коэффициент;

U_i – местная скорость.

Существует большое количество подобных формул. Но наиболее распространенными являются следующие:

- для основного способа измерения расхода воды

$$\bar{U} = 0.5 \cdot U_{0.2} + 0.5 \cdot U_{0.8} \quad (1.2)$$

- для многоточечного способа

$$\bar{U} = 0.05 \cdot U_{1.0} + 0.347 \cdot [U_{0.8} + U_{0.2}] - 0.173 \cdot U_{0.8} + 0.083 \cdot U_0 \quad (1.3)$$

или

$$\bar{U} = 0.1 \cdot (U_{1.0} + U_{0.2} + U_{0.3} + U_{0.4} + U_{0.5} + U_{0.6} + U_{0.7} + U_{0.8} + U_{0.9} + U_0) \quad (1.4)$$

Эти формулы рассчитаны для выпуклых одномодальных эпюр, хотя в условиях, когда местные особенности гидроствора приводят к резкому усложнению скоростного поля потока распределения скоростей по глубине может приобретать самый различный характер (зарастающее русло, ледостав, нестационарность потока). В таких случаях аналитические предпосылки построения формул вида (1.2) и (1.3) общность и точность определения скорости может заметно снижаться. Эти обстоятельства приводят к необходимости использования иных методов вычисления средней скорости на вертикали по данным дискретных измерений [3].

2 СТАНДАРТНАЯ ЛИНЕЙНО – ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ РАСХОДА ВОДЫ

2.1 Метод «скорость – площадь»

Существующие методы определения расхода воды можно разделить на две основные группы: непосредственные измерения и косвенные определения. К первой группе относится объемный метод, основанный на измерении расхода воды посредством мерных сосудов, подставляемых под струю воды. Этот метод применим только на малых водотоках, расход измеряется с большой точностью. Косвенное определение расхода воды выполняется различными методами, особенностью которых является не измерение самого расхода (объема воды), а отдельных элементов потока, а величину расхода получают путем вычислений. К таким методам относятся:

- 1) Определение расхода воды по измеренным скоростям течения и площади поперечного сечения потока (метод «скорость – площадь»).
- 2) Метод смещения (электрометрический, тепловой, колориметрический).
- 3) Определение расхода воды с помощью мерных устройств: водосливов, гидрометрических лотков, здесь измеряемой величиной является напор, через который по гидравлическим зависимостям определяют расход воды (Q).
- 4) Физические методы – с применением ультразвука, электромагнитной индукции.

Метод «скорость-площадь» (а иначе линейно – детерминированная модель расхода воды) наиболее распространен в речной гидрометрии.

Сущность метода «скорость – площадь» заключается в определении объема модели расхода, т. е. водяного тела объемом, численно равным расходу воды через поперечное сечение потока. Рассмотрим поперечное сечение потока (рисунок 2.1). Скорости течения в различных точках сечения неодинаковы:

наибольшие скорости у поверхности в середине потока, а у берегов и дна они меньше. Соответственно этому различны и расходы воды через элементарные площадки в различных частях поперечного сечения. Скорости в различных точках могут иметь разные направления. Чтобы определить расход воды через элементарную площадку, необходимо площадь этой площадки умножить на скорость течения. Но поскольку вектор местной скорости может быть направлен под углом к нормали, то следует учитывать не сам вектор, а его проекцию на нормаль.

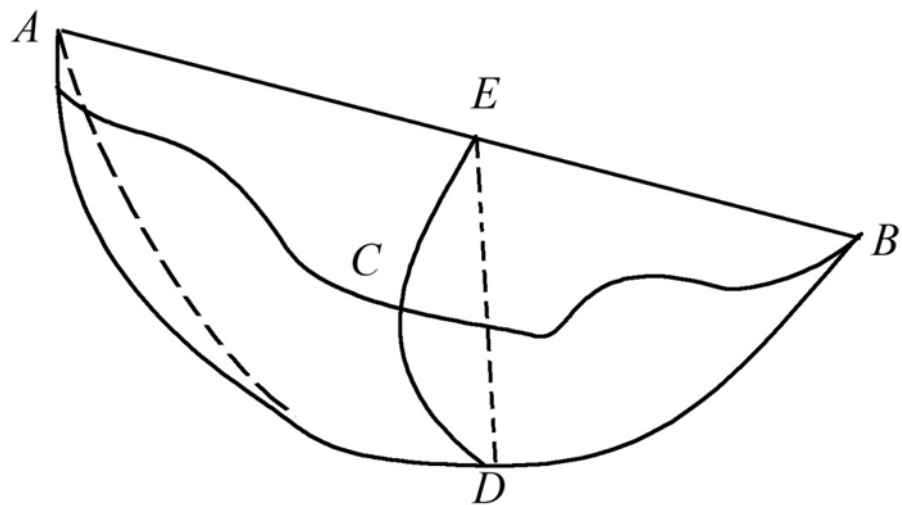


Рисунок 2.1 – Модель расхода

(ADBE – живое сечение; ACDE – эпюра поверхностных скоростей; ECD – эпюра скоростей на вертикали)

Тогда расход воды через элементарную площадку выражается формулой

$$dQ = U \cos \alpha \cdot d\omega \quad (2.1)$$

где U – скорость в пределах элементарной площадки;

α – угол между направлением скорости и нормалью;

$d\omega$ – величина элементарной площадки.

Расход воды через всю площадь поперечного сечения потока будет:

$$Q = \int_{\omega} U \cos \alpha \cdot d\omega = \int_{x=0}^{x=B} \int_{y=0}^{y=h} U \cos \alpha \cdot dx dy \quad (2.2)$$

Если $\alpha = \text{const} \neq 0$, то выражение (2.2) можно представить в виде:

$$Q = \cos \alpha \int_0^B \int_0^h U \cdot dx dy \quad (2.3)$$

Если во всех площадках вектор скорости направлен по нормали (т.е. $\alpha = 0$), тогда выражение (2.2) примет вид:

$$Q = \int_0^B \int_0^h U \cdot dx dy = \int_{\omega} U \cdot d\omega \quad (2.4)$$

Полученная формула выражает модель расхода воды, изображенного на рисунке (2.2). Водяное тело сзади ограничено сечением потока, сверху – поверхностью, которая представляет собой эпюру поверхностных скоростей течения, и спереди – криволинейной поверхностью, определяемой зависимостью $U = f(x, y)$, но вид данной функции не известен. На практике измеряют площадь поперечного сечения потока и скорости течения на вертикалях, а расход вычисляют по приближенной формуле, заменяя интегрирование суммированием. Данный способ называется аналитическим [3].

Определение расхода можно рассмотреть со следующих позиций:

1. если известны расходы воды на вертикалях

$$Q = \int_0^B q dx \quad (2.5)$$

где q – элементарный расход, который равен произведению средней скорости на вертикали и глубины на вертикали, определяется выражением:

$$q = \mathcal{G}_B h$$

B – ширина реки (рисунок 2.2 а)

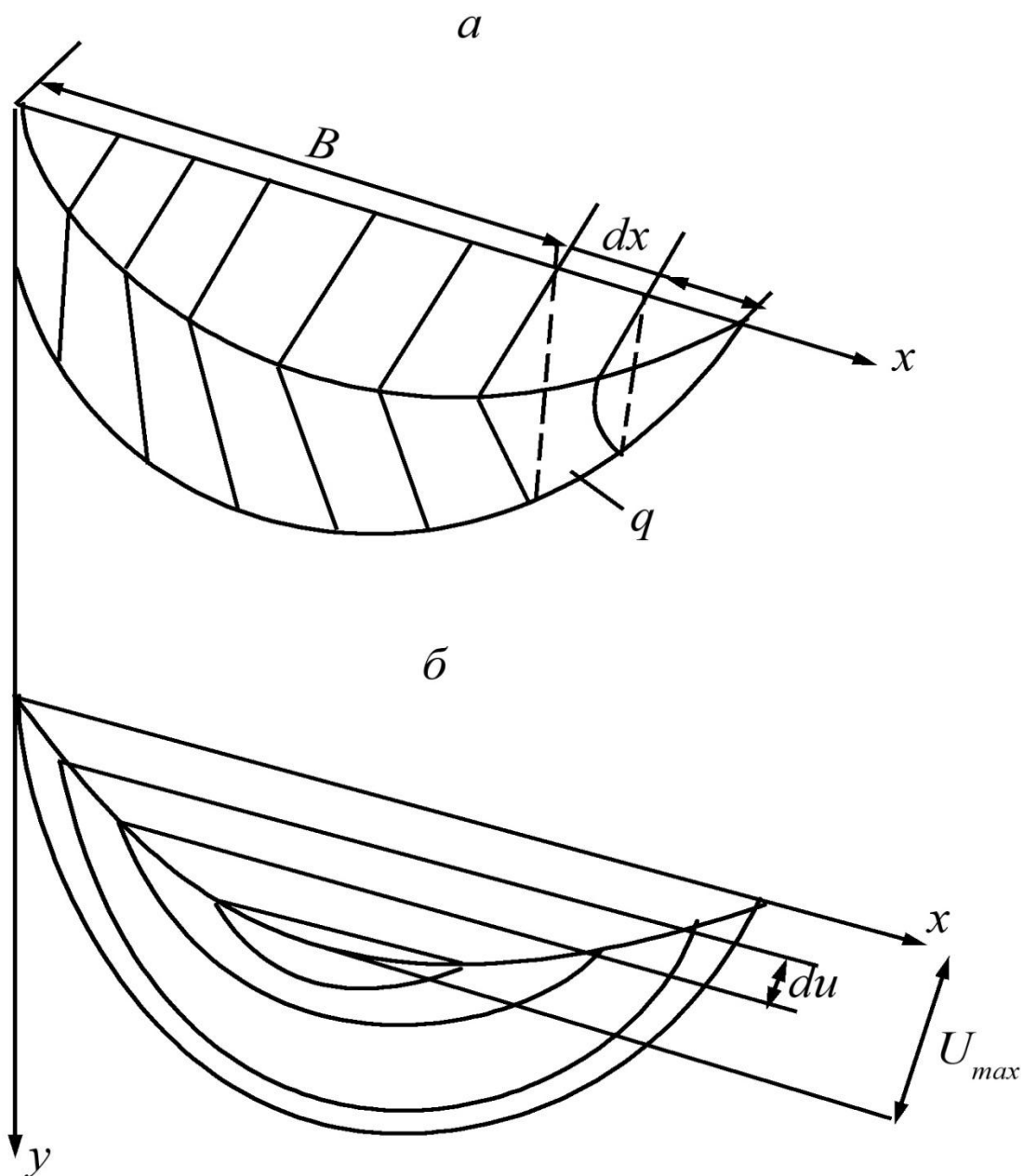


Рисунок 2.2 - Схема к вычислению расхода воды

2. если в сечении потока провести изотакхи (линии равных скоростей), определяя площади заключенные между каждой изотакхой и линией уровня воды

$$Q = \int_0^{U_{\max}} \omega_u du \quad (2.6)$$

где ω_u – площадь, ограниченная изотаксой со скоростью "U" и линией уровня воды;

U_{max} – наибольшая скорость в сечении потока (рисунок 2.2 б)

Решение интеграла (2.6) выполняется методом конечных разностей, а интеграла (2.5) графическим способом.

2.2 Развитие моделей расходов воды и способов его измерений методом «скорость – площадь»

Метод «скорость – площадь» имеет ряд разновидностей, одни из них имеют лишь историческое значение (метод изотакс), другие продолжают успешно применяться и сейчас в гидрометрической практике, их аналитическая основа представляется следующим выражением:

$$Q = \sum_{S=1}^N \omega_S \bar{\varphi}_S \quad (2.7)$$

где N – количество S -тых отсеков, на которые разбивается скоростными вертикалями живое сечение;

$\omega_S; \bar{\varphi}_S$ – площадь и средняя скорость течения S -того отсека.

Применительно к стандартным способам измерения расхода воды – основному и детальному, предусмотрена наставлениями модель расхода воды выражается формулой:

$$Q = \sum_{S=1}^N \omega_S P_S (\vartheta_i + \vartheta_j) \quad (2.8)$$

где $\vartheta_{i,j}$ – средние скорости на ограничивающих S -тых отсек вертикалях;

P_S – весовой коэффициент.

Коэффициент $P_s = 0.5$ при $1 < S < N$, а в прибрежных отсеках (при $S = 1, N$) величина P_s определяется в зависимости от формы профиля данных отсеков.

Если количество скоростных вертикалей в створе составляет $N_g - 8 \div 10$; то точность дискретного измерения скоростей потока считается приемлемой. Если условия измерений сложны, что бывает обусловлено сложной кинематической структурой потока, неоднородным профилем дна в створе, тогда необходимое количество вертикалей надо увеличить, вот почему стандартные способы (2.8) характеризуются высокой трудоёмкостью и большой длительностью измерений (на крупных реках 7 и более часов). Этим объясняется необходимость создания усовершенствованных ускоренно-сокращенных методов измерения расходов воды. Дадим краткий обзор этих методов.

В литературе последних лет содержится много предложений по ускорению измерений расхода воды на основе данных о поверхностных скоростях потока. Хорошо известен гидравлико – гидрометрический способ Г.В. Железнякова [6], по которому расход воды вычисляется по следующей зависимости:

$$Q = Q_{op} - \frac{\beta'}{K} Q' \quad (2.9)$$

где Q_{op} – фиктивный расход воды, вычисляемый по измеренным поверхностным (наибольшим) скоростям течения воды U_{max} и глубиной h .

$$Q_{op} = \int_0^B q_\phi \cdot db$$

$$q_{op} = q_{op}(\epsilon).$$

Q – динамический расход, который равен

$$Q' = \omega \sqrt{qh_c y}$$

- ω, h_c – площадь и средняя глубина сечения;
 y – уклон водной поверхности в створе;
 K и β – гидравлический параметр, и параметр формы живого сечения, рассчитываемые по специальной методике.

Так же широко известна модель В.Е. Сергутина [15], расчетным выражением, которого является следующее:

$$Q = K_l * \omega * v * h_{max}, \quad (2.10)$$

где v – максимальная (поверхностная) скорость течения;

h_{max} – максимальная глубина в створе;

K_l – корректирующий множитель, рассчитываемый по данным предварительных измерений.

Недостаток в том, что предпосылкой служит положение максимальной скорости на поверхности, хотя это выполняется далеко не всегда [4, 11].

Определение поверхностных скоростей течения при дальнейшем переходе к средней скорости потока отличается наибольшей простотой, однако, методическое обоснование перехода от поверхностной измеренной скорости к средним скоростям сечения оказывается более сложным.

Дальнейшие исследования поплавочного коэффициента показали, что средние значения K_f колеблются в пределах от 0,84 до 0,90, следовательно, допущение постоянства этого коэффициента не приемлемо.

Расчет K_f производится на гидравлической основе с учетом закона распределения скоростей течения в живом сечении, полученном А.В. Караушевым [8, 9], Г.В. Железняковым [5, 6] и другими.

Более обоснованным для речной гидрометрии является параболический закон распределения скоростей по глубине потока, выражаемый параболой Базена с дополнительной степенью свободы – не фиксированным положением максимума скорости (U_{max}) на вертикали [11].

$$U(z) = U_{\max} - \frac{m g_*}{\sqrt{g}} (1 - \alpha z)^2 \quad (2.11)$$

где z – относительное расстояние от дна;

m – эмпирический коэффициент Базена, равные $m = 24.0 M^{1/2}$;

g – динамическая скорость;

α – параметр положения максимальной скорости на вертикали $\alpha = \frac{1}{z_i}$,

где $z_i = \arg U_{\max}(z)$.

В связи с появлением более совершенных средств измерений способ интеграции поверхностных скоростей обрел новое значение. Уже созданы и испытаны опытные образцы измерителей поверхностной скорости с движущегося судна (электромагнитный измеритель ЦНИИС, система «створ» ГГИ).

В случаях, когда приходится располагать минимум измерительных данных широко используется метод репрезентативных вертикалей, предложенных в двух вариантах: детерминированный и статистический. В первом расход определяется по функции В.Е. Буравлева [1].

$$Q = K_3 B \frac{g_1 h_1 + g_2 h_2}{2} \quad (2.12)$$

где g – средние скорости на вертикалях, расположенных на расстояниях $0,2B$ от урезов;

h – средние глубины на вертикалях, расположенных на расстояниях $0,2B$ от урезов;

B – ширина потока;

K_3 – эмпирический корректирующий множитель.

Во втором варианте связь средней скорости потока $\bar{g}$ со скоростями g_1 и g_2 осуществляется уравнением множественной линейной регрессии

$$\mathcal{Q} = a_0 + a_1 \overline{\mathcal{Q}}_1 + a_2 \overline{\mathcal{Q}} \quad (2.13)$$

где a – регрессионные коэффициенты, вычисляемые по методу наименьших квадратов [14].

Этот способ предложен в отделе гидрометрии ГГИ для достаточно изученных створов. Наилучшие результаты достигаются при построении зависимости (2.13) для фазооднородных периодов гидрологического цикла.

Определение расхода воды по репрезентивным элементам производится в следующем порядке:

- измеряются репрезентивные скорости течения;
- по измеренной $\mathcal{Q}_1$ вычисляется с помощью принятого уравнения регрессии, средняя скорость потока $\mathcal{Q}_{\text{пс}}$;
- по измеренному уровню воды снимается с кривой $\omega = f(H)$ площадь водного сечения потока;
- вычисляется расход воды, как произведение средней скорости на площадь сечения.

У метода репрезентативных вертикалей так же имеются недостатки:

1. Необходимость устойчивости русла в створе измерений.
2. Необходимость статистического обоснования при достаточном объеме предварительных измерений.
3. Недостаточный учет конкретных особенностей скоростного поля потока, что может привести к большим погрешностям измерений расхода воды

А.П. Браславским предложен способ определения расхода воды при сокращении количества скоростных вертикалей [1].

$$Q = \sum_{s=1}^N K_s \omega_s \mathcal{Q}_s(\dot{A}), \quad (2.14)$$

где

$$K_s = 0.75 \frac{1 - n^4}{1 - n^3};$$

$$n = \mathcal{Q}(\dot{i}) / \mathcal{Q}(\dot{A});$$

$g(i)$ и $g(A)$ – маленькая и большая из скоростей, ограничивающих S – тый отсек сечения.

В основе данного способа лежит формула Шези–Манинга, описывающая распределение скоростей по ширине потока в зависимости от глубины на вертикалях. В выражении (2.14) лежит предпосылка линейного изменения глубин, а это грубое приближение, особенно при малом числе скоростных вертикалей, в связи с тем, эффективность метода заметно снижается.

В последнее время И.Ф. Карасевым предложены так называемые интерполяционно – гидравлические модели расхода воды [10, 11, 12], их особенность заключается в расчленении измеренных скоростей на несколько генетических составляющих с последующей интерполяцией по ширине потока на гидравлично – статистической основе. Описанию и анализу этих моделей посвящены 3 и 4 главы данной выпускной квалификационной работы.

Очевидно, что ускоренно-сокращенные способы могут быть созданы только с использованием некоторых общих гидравлично – морфометрических закономерностей руслового потока и корректной интерпретации необходимого минимума данных измерений, что видно из обзора существующих методов измерения расхода воды. Вся история развития методов измерения расходов воды состоит в непрерывном совершенствовании измерений, прежде всего с точки зрения повышения их точности и трудоемкости.

3 ЛИНЕЙНЫЕ ИНТЕРПОЛЯЦИОННО – ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РАСХОДА ВОДЫ

3.1 Линейная интерполяционно – гидравлическая модель расхода воды

Измерения расходов воды методом «скорость – площадь» с применением гидрометрических вертушек K один из наиболее распространенных видов наблюдений на сети гидрологических постов. Однако такие измерения связаны с большими затратами времени и труда. Что касается погрешности измеренных расходов воды как мгновенной характеристики потока, то при неустановившемся режиме она возрастает с увеличением длительности измерений. Таким образом, необходимость оптимизации измерений расходов воды предопределяется как требованиями сокращения трудовых затрат на их выполнение, так и задачей повышения точности получаемых результатов.

При решении этой задачи важная роль отводится сокращенным или, в более общем смысле, ускоренным измерениям расходов воды, применение которых предусмотрено Наставлением, вып.6, ч. I. Эти методы достаточно разнообразны. Одни из них хорошо известны, другие – разработаны сравнительно недавно. Тем не менее, до последнего времени (если не считать некоторых общих указаний) отсутствуют рекомендации по условиям эффективности их применения.

В настоящее время разрабатываются комплексы технических средств для ускоренных измерений расходов воды. Уже созданы опытные образцы ультразвуковых установок и аппаратуры для интеграции поверхностных скоростей с движущегося судна. Внедрение этих новых средств потребует некоторого времени. Впредь до их широкого внедрения целесообразно использовать имеющиеся методические и технические возможности для ускорения измерений расходов воды на базе оборудования, существующего на гидрологической сети, без снижения точности получаемых результатов.

Одним из первых вариантов ускоренных измерений расходов воды, получивший широкое распространение, является метод репрезентативных элементов. В настоящих Методических рекомендациях эта методика нашла дальнейшее развитие, в частности, уточнены критерия по выбору местоположения репрезентативных вертикалей; разработана и обоснована новая модель расхода воды, в которой в качестве характерной скорости используется средняя скорость течения на скоростной горизонтали; применены более совершенные аналитические методы для статистического обобщения материалов; сформулированы критерии применимости метода репрезентативных элементов при неустановившемся движении воды.

В основу методики измерения расходов воды при сокращении числа скоростных вертикалей положены принципы гидравлической интерполяции скоростей. Два варианта линейной интерполяционно – гидравлической модели расхода воды позволяют сократить число скоростных вертикалей по сравнению с принятым при основном способе измерения расхода воды по крайней мере в 2 – 3 раза без потерь в точности получаемых результатов.

Методической основой современных наблюдений являются стандартные способы измерения расхода воды (основной и детальный) [13]. Модель, выражающую существо этих методов, называем линейно – детерминированной [10, 11] подразумевающая линейность интерполяции измеренных скоростей в интервале между скоростными вертикалями при определении средней скорости частного отсека. Устранить недостатки ЛД-модели, определить, оптимальное состояние в использовании информации призваны интерполяционно-гидравлические модели расхода воды, разработаны в ГГИ И.Ф. Карасевым и В.А. Ременюком [10, 11].

Интерполяционно – гидравлические модели расхода воды не отменяют стандартных способов в условиях, где последние обеспечивают заданную точность получаемых результатов и характеризуются удовлетворительной трудоемкостью измерительного процесса. Скорость течения в частных отсеках, согласно этим моделям, интерполируется с учетом распределения глубин по

ширине потока, в результате чего появляется возможность существенно сократить необходимое число скоростных вертикалей без заметного снижения точности измерений. Рассмотрим структуру интерполяционно-гидравлических моделей [15]. Прямой путь ускорения процесса измерения расхода воды основным способом - сокращение числа скоростных вертикалей приводит обычно к снижению точности из-за потерь информации о распределении скоростей по ширине реки. Это объясняется тем, что скорости между скоростными вертикалями аппроксимируются линейной независимостью (рисунок 3.1).

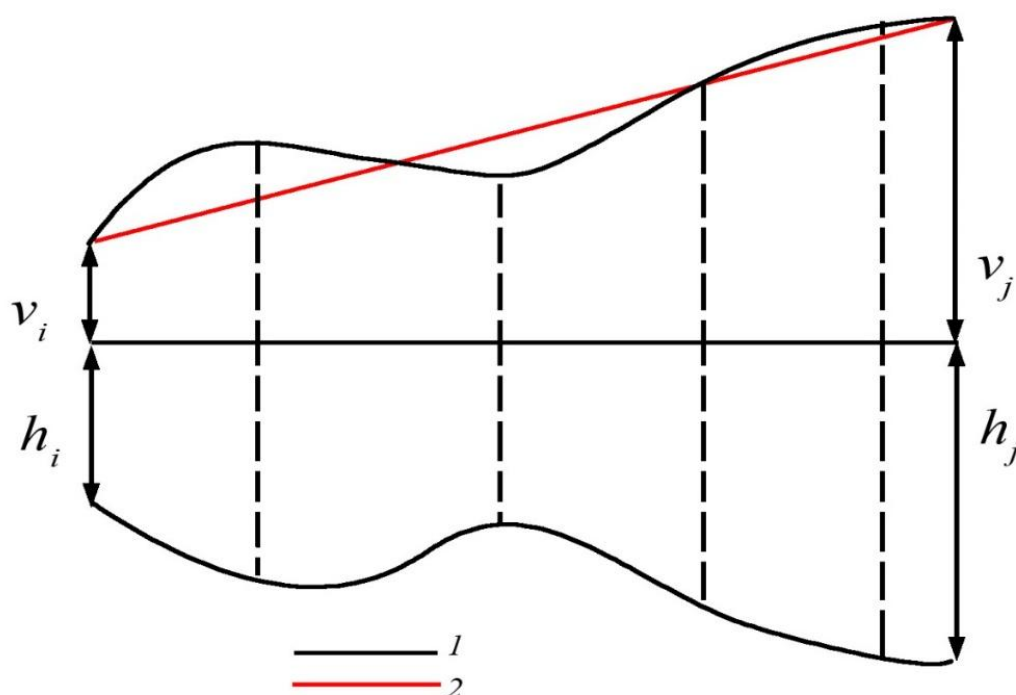


Рисунок 3.1 – Эпюра распределения средних скоростей течения по ширине отсека и её аппроксимация при линейной интерполяции.

- (1 – скоростные вертикали при стандартном способе измерения расхода воды;
2 - линейная интерполяция скоростей между их измеренными значениями v_i и v_j).

Поэтому наиболее важным условием при сокращении числа скоростных вертикалей является учет изменения скоростей течения по ширине русла. В рассматриваемой ниже модели определение расхода воды эта задача решается на интерполяционно-гидравлической основе. Известно, что скорость течения гидравлически связана с глубиной потока, и, следовательно, характер

распределения глубин, в общем, предопределяет характер распределения скоростей. Однако в естественных условиях это соответствие часто затушевывается местными структурными особенностями кинематики потока.

В связи с этим скорости течения на любой i -й вертикали может быть представлена в виде суммы двух компонентов: гидравлической и структурной составляющей скорости (рисунок 3.2).

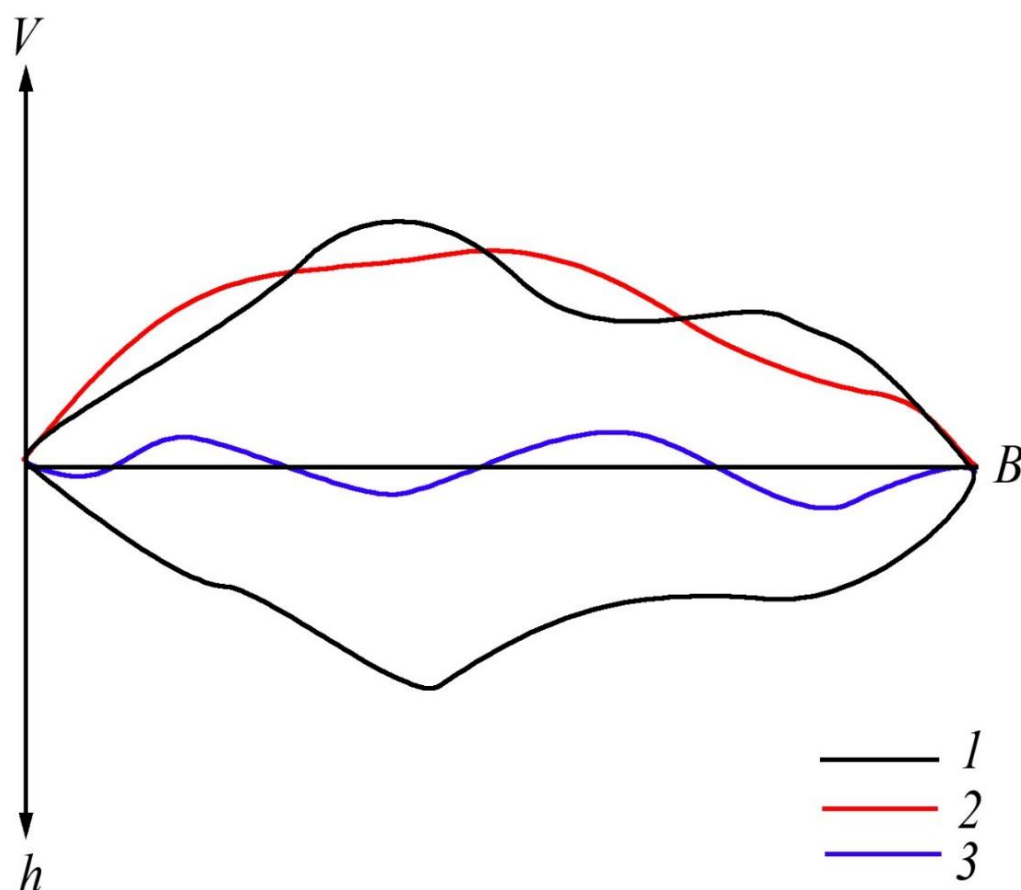


Рисунок 3.2 – Разложение плановой эпюры измеренных скоростей (1) на сумму гидравлической (2) и структурной (3) составляющих.

Из рисунка 3.2 видно, что гидравлическая составляющая ϑ образует как бы гидравлическое ядро Q , определяющее его значение.

$$\vartheta_i = \dot{\vartheta}_i + \Delta\vartheta_i \quad (3.1)$$

где $\dot{\vartheta}_i$ и ϑ_i – гидравлическая и структурная составляющие скорости течения соответственно. Гидравлическая составляющая скорости

течения связана с глубиной потока и представляется в соответствии с формулой Шези – Манинга (3.2).

$$\vartheta_{i(j)} = \frac{1}{n} J_0^{1/2} h_{i(j)}^{2/3} = a_{i(j)} h_{i(j)}^{2/3} \quad (3.2)$$

где J_0 – уклон водной поверхности;

n – коэффициент шероховатости;

$h_{i(j)}$ – глубина на $i(j)$ вертикали;

$a_{i(j)}$ – гидравлические коэффициенты соответственно для i -й и j -й вертикалей.

Среднее значение структурных составляющих скорости ($\Delta\vartheta_s$) для s -го отсека представляется выражением:

$$\Delta\vartheta_s = P_s(\vartheta_i - a_i h_i^{2/3} + \vartheta_j - a_j h_j^{2/3})_3 \quad (3.3)$$

где P_s – весовой коэффициент.

Строго говоря, значение коэффициента P_s должно определяться в зависимости от коррекции скоростей течения в s -ом отсеке методами, так называемой оптимальной интерполяции. Однако учитывая сложность такого подхода, обычно ограничиваются линейной интерполяцией структурных составляющих, принимая $P_s = 0,5$ при $1 < S < N$, для береговых отсеков принимается $P_s = 0,7$ при $S = 1, N$. Рассматриваемая модель расхода воды получила название линейно-интерполяционно-гидравлической. Ниже рассматриваются два варианта модели, отличающиеся способами определения гидравлических коэффициентов a_i и a_s . В модели ЛИГ-1 значение коэффициента a_i и a_s определяется с помощью графиков связи $a_i = a_i(h_i)$ и $a_s = a_s(h_s)$, которые строятся на основании предварительных измерений расходов воды основным или детальным способом при полном количестве скоростных вертикалей. Таким образом, применение этой модели возможно

только на изученных гидрометрических створах при фиксированном положении скоростных вертикалей. Подсчет измеренного расхода воды в этом случае ведется по формуле:

$$Q = \sum_1^N \omega_s \left[a_s h_s^{2/3} + P_s (\vartheta_i - a_i h_i^{2/3} + \vartheta_j - a_j h_j^{2/3}) \right] \quad (3.4)$$

где N – число отсеков;

ω_s – площадь сечения s – го отсека;

ϑ_i, ϑ_j – скорости течения, измеренные на i – ой и j – ой вертикалях, ограничивающих s – й отсек.

При использовании ЛИГ–2 рассчитывается среднее для всего потока значение гидравлического коэффициента a_0 в зависимости от скоростей и глубин на вертикалях, полученных при данном измерении:

$$a_0 = \frac{1}{N_V} \sum_{i=1}^{N_V} \frac{\vartheta_i}{h_i^{2/3}} \quad (3.5)$$

где N_V – количество скоростных вертикалей в сечении.

Формула для подсчета измеренного расхода воды в этом случае имеет следующий вид:

$$Q = \sum \omega_s \left[a_0 h_s^{2/3} + P_s (\vartheta_i - a_0 h_i^{2/3} + \vartheta_j - a_0 h_j^{2/3}) \right] \quad (3.6)$$

Выражение (3.6) можно преобразовать и показать связь ЛИГ – моделей со стандартными ЛД – моделями расхода воды:

$$Q = \sum_{s=1}^N P_s \omega_s (\bar{\vartheta}_i + \bar{\vartheta}_j)_s + \sum_{s=1}^N a_0 \omega_s \left[h_s^{2/3} - P_s (h_i^{2/3} + h_j^{2/3})_s \right] = Q_{\text{лд}} + \Delta Q \quad (3.7)$$

где $Q_{\text{лд}}$ – расход, определяемый стандартным (основным) способом;

ΔQ – корректив, отражающий форму профиля дна в частных отсеках сечения.

По формуле (3.7) видно, что корректив ΔQ при увеличении дискретизации изменений стремится к нулю: при увеличении количества отсеков разница между h_s , h_i и h_j становится всё меньше в пределах данного отсека. Следовательно, при увеличении количества скоростных вертикалей ЛИГ– модели дают тот же результат, что и модели ЛД. Что касается сокращенного варианта измерений (при малом N_v) значение расхода $Q_{\text{лд}}$ оказывается систематически меньше значений, полученных с помощью ЛИГ– модели.

В отличие от модели ЛИГ – 1, модель ЛИГ – 2 может использоваться и на не изученных гидрометрических створах, поскольку она основана исключительно на результатах выполняемого измерения расхода воды. Обоснование ЛИГ – моделей начинается с анализа формы живого сечения и поля скоростей потока. При наличии четко выраженных гидравлически обоснованных участков живого сечения [например, руслового и пойменного участков (рисунок 3.3)] в каждом из них назначается не менее двух скоростных вертикалей, а также промерная вертикаль на границе раздела обособленных участков (вертикаль №8 на рисунок 3.3).

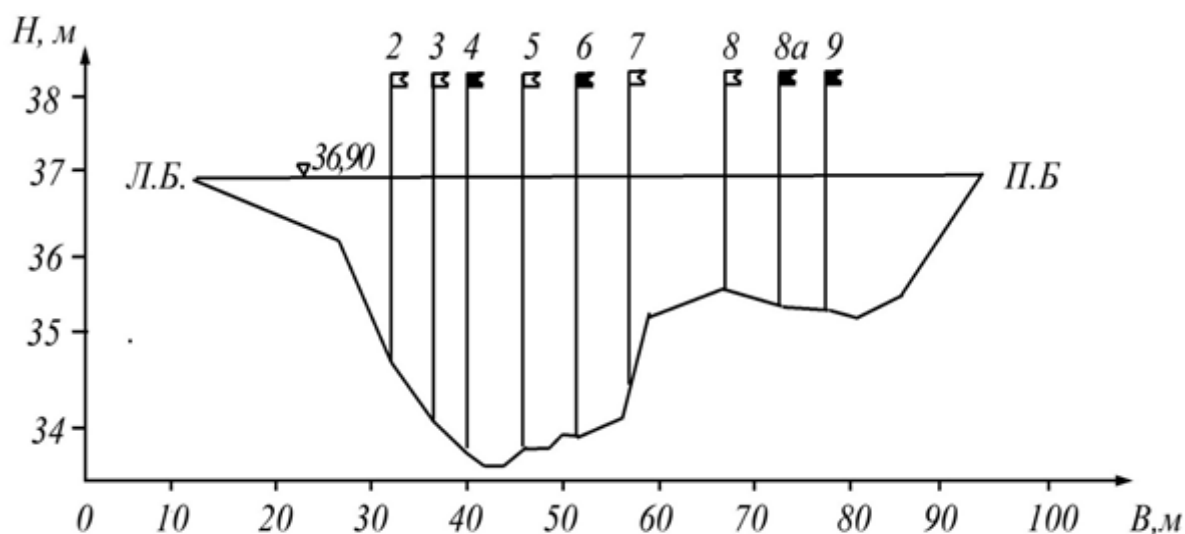


Рисунок 3.3 – Профиль гидрометрического створа

Для обоснования модели ЛИГ – 1 в конкретном гидрометрическом створе необходимо располагать совокупностью не менее $30 \div 40$ расходов воды, измеренных основным или детальным способами. Положение скоростных вертикалей должно быть постоянным, а распределение измеренных расходов воды по амплитуде колебания уровня воды – равномерным.

Графически зависимости $a(h)$ строятся в следующем порядке:

1) для всех скоростных вертикалей вычисляются значения гидравлических коэффициентов a_i по формуле:

$$a_i = \frac{v_i}{h_i^{2/3}} \quad (3.8)$$

и на основании этих данных для каждой вертикали строятся графики связи $a = f(h_i)$;

2) из общего числа скоростных вертикалей в качестве рабочих вертикалей для измерения расходов воды в соответствии с моделью ЛИГ – 1 назначаются те, для которых связи $a_i = f(h)$ имеют наибольшую тесноту.

3) для отсеков, ограниченных выбранными вертикалями, вычисляются значения гидравлического коэффициента a_s по формуле:

$$a_s = \frac{v_s}{h_s^{2/3}} \quad (3.9)$$

и на основе этих данных строят графики связи $a_s = f(h_s)$.

О качестве работы ЛИГ – моделей (и сокращенных способов вообще) применительно к конкретному створу можно судить по степени расхождения результатов детальных и сокращенных измерений расходов воды. При этом в качестве эталона для сравнения принимается расход воды, полученный по ЛД – модели при полном количестве скоростных вертикалей, и в каждом случае определяется относительное отклонение единичного измерения

$$\delta Q = \frac{Q - Q_0}{Q_0} \quad (3.10)$$

где Q_0 – расход, измеренный детальным способом;

Q – расход, измеренный сокращенным способом.

Объективным критерием качества ЛИГ – моделей служит соответствие случайной ($\tilde{\sigma}_Q$) и систематической ($\tilde{m}_Q$) погрешностей измерения расхода следующим условиям:

$$\tilde{\sigma}_Q = \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\delta Q)_k^2 \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

$$\tilde{m}_Q = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (\delta Q)_k \quad (3.12)$$

где N – длина ряда сравнительных измерений расхода воды;

k – текущий номер расхода из совокупности k расходов.

Точность ЛИГ – моделей признается удовлетворительной, если выполняются следующие условия: $\tilde{\sigma}_Q \leq 5\%$, $\tilde{m}_Q \leq 2 - 3\%$

Несоблюдение условий (3.11) и (3.12) свидетельствует о том, что данная ЛИГ – модель ещё не может считаться оптимальной в конкретных условиях, и следовательно, необходимо или изменить положение скоростных вертикалей или увеличить их количество в створе, добиваясь удовлетворения требований (3.11) и (3.12).

Контроль качества измерений в практике учета стока можно произвести опытным способом по отклонению точек от стандартной кривой $Q(H)$, если отклонение измеряемых расходов не превышает допускаемой величины, точность измерений данного расхода считается приемлемой [13].

3.2 Упрощенная интерполяционно – гидравлическая модель расхода воды

Несмотря на физическую обоснованность ЛИГ – моделей, обе они отличаются несколько более сложным вычислительным аппаратом по сравнению со стандартной ЛД – моделью. В связи с этим, развивая

предпосылки гидравлической интерполяции скоростей по ширине потока, в ГГИ предложена упрощенная интерполяционно – гидравлическая модель расхода воды, обладающая не худшими характеристиками точности и имеющая простой аппарат расчета. Взяв за основу модель ЛИГ – 2, путем несложных алгебраических преобразований получено расчетное выражение для вычисления расхода воды.

$$Q = \sum_{s=1}^N f_s \bar{v}_s = \sum_{s=1}^N f_s \frac{h_s^{2/3}}{h_i^{2/3} + h_j^{2/3}} (v_i + v_j), \quad (3.13)$$

где h_s – средняя глубина s – того отсека;

b_s – ширина отсека;

i и j – индексы левой и правой скоростных вертикалей, ограничивающих s – тый отсек.

Эта зависимость получена из следующего выражения:

$$\frac{\bar{v}_s}{(v_i + v_j)_s} = \frac{a_0 h_s^{2/3}}{a_0 (h_i^{2/3} + h_j^{2/3})}, \quad (3.14)$$

где значения скоростей на вертикалях и в среднем по отсеку определяются так же, как это принято в модели ЛИГ – 2.

Из зависимости (3.14) следует выражение средней скорости в частном отсеке сечения:

$$\bar{v}_s = \frac{h_s^{2/3}}{(h_i^{2/3} + h_j^{2/3})} (v_i + v_j)_s. \quad (3.15)$$

Как видим, в отличие от стандартной ЛД – модели в качестве интерполяционного коэффициента для определения средней скорости отсека

вместо $\frac{1}{2}$ используется функция, учитывающая распределение глубин в отсеке:

$$\frac{h^{2/3}}{h_i^{2/3} + h_j^{2/3}}.$$

Для ещё более простого вычисления принимают:

$$\frac{h^{2/3}}{h_i^{2/3} + h_j^{2/3}} \approx \frac{h_s}{(h_i + h_j)_s}. \quad (3.16)$$

Отсюда следует расчетная зависимость для определения расхода воды в данном дипломном проекте:

$$Q_{\text{уиг}} = \sum_{s=1}^N q_s = \sum_{s=1}^N f_s \vartheta_s = \sum_{s=1}^N f_s \frac{h_s}{h_i + h_j} (\vartheta_i + \vartheta_j)_s, \quad (3.17)$$

где q_s – частичные расходы воды;

f_s – площади отсеков $s \in [1; N]$.

Своеобразна гидравлически детерминированная модель, предложенная нидерландскими исследователями. Она предусматривает предельно подробную аппроксимацию скоростной эпюры по промерным вертикалям, исходя из имеющихся измерений скорости и глубины. Существует несколько модификаций этой модели (близких по точности и расчетному алгоритму), наиболее гидравлически обоснованная модель имеет вид:

$$Q_{\text{ЛД}} = 0.5 \sum_{k=1}^{m+1} f_k (\vartheta_{k-1} + \vartheta_k), \quad (3.18)$$

где

$$f_k = 0,5 (h_{k-1} + h_k) b_k;$$

$$\vartheta_k = \frac{h_k^{2/3}}{b_k} \left(\frac{\vartheta_i}{h_i^{2/3}} b_{jk} + \frac{\vartheta_j}{h_j^{2/3}} b_{ik} \right);$$

- Q – расход воды;
 i и j – индексы скоростных вертикалей;
 k – индекс промерных вертикалей;
 h_i, h_j и h_k – глубины на соответствующих вертикалях;
 v_i, v_j и v_k – скорости на соответствующих вертикалях;
 f_k и b_k – площадь и ширина k – го отсека между промерными вертикалями;
 b_{ik} и b_{jk} – расстояние от ближайших левой и правой скоростных вертикалей до k – й промерной.

3.3 Корреляционно – гидравлическая модель расхода воды

В теории оптимизации известен подход, когда минимизации подлежит частота повторяемости наибольших погрешностей рассчитываемой величины (в нашем случае – расхода воды). В такой постановке оптимальная модель совпадает с моделью (3.19):

$$Q = a_1 Q_1 + a_2 Q_2, \quad (3.19)$$

где Q_1 – расход, вычисленный по модели, не зависящей от согласованности $v_1 h$;

Q_2 – расход, вычисленный по более точной модели.

Причем коэффициенты a_1 и a_2 вычисляются с учетом корреляционных характеристик рассматриваемого процесса.

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= 1 - z_{02} \frac{T_{01}}{T_{12}} \\ a_2 &= z_{02} \frac{T_{01}}{T_{12}} \end{aligned} \right\}, \quad (3.20)$$

где z_{02} – коэффициент корреляции рядов Q_0 и Q_2 ;

Q_0 – действительные значения расхода воды;

τ_{01} – среднеквадратичное отклонение Q_0 от Q_1 ;

τ_{02} – среднеквадратичное отклонение Q_1 от Q_2 .

Смысл Q_1 и Q_2 – такой же, как и в общей формуле комбинированной модели (3.19).

По предложению В.А. Ременюка, выразим элементы модели Q_1 и Q_2 ; a_1 и a_2 следующим образом: в качестве Q_1 примем расход $Q_{\text{лд}}$ (3.18), причем K_m зависит от числа скоростных вертикалей N_v .

$$K_m = \frac{1}{1 + \delta Q_m} = \frac{(N_0 + 2)^3 - 8}{(N_\vartheta + 12)^3 - 16} \quad (3.21)$$

где δQ_m – систематическая относительная погрешность измерения расхода Q_m при малом числе m отсеков между скоростными вертикалями ($m = N_\vartheta + 1$).

Оценим связь действительной абсолютной погрешности ΔQ_m ($\Delta Q_m = Q_m - Q_0$) с её приближенным значением ΔQ_{mN} , вычисленной по отношению к расходу Q_N ($\Delta Q_{mN} = Q_m - Q_N$).

Заметим, что замена ΔQ_m на ΔQ_{mN} , при числе отсеков $N \gg m$ часто используется для оценки погрешности дискретизации на практике:

$$Q = Q_m - \Delta Q_m = Q_N - \Delta Q_N, \quad (3.22)$$

что приводит к соотношению:

$$\Delta Q_{mN} = \Delta Q_m - \Delta Q_N. \quad (3.23)$$

Между тем, из теории численных методов известна приближенная оценка ΔQ_m и ΔQ_N :

$$\Delta Q_m = \frac{B^4}{12(m+1)^3} q''(\xi_m); \quad (3.24)$$

$$\Delta Q_N = \frac{B^4}{12(N+1)^3} q''(\xi_N), \quad (3.25)$$

где B – ширина живого сечения;

$q(\ell)$ – удельный расход на вертикали с координатой ℓ , равный $= \vartheta h(\ell)$;

ξ_m и ξ_N – некоторые координаты в гидростворе.

Аналогичным допущением, принятым для обоснования приема Рунге при оценке погрешности численного интегрирования положили примерное равенство вторых производных:

$$q''(\xi_m) \approx q''(\xi_N). \quad (3.26)$$

С учетом, которого устанавливается соотношение:

$$\Delta Q_N \approx \Delta Q_m \left(\frac{m+1}{N+1} \right)^3. \quad (3.27)$$

Когда абсолютная погрешность ΔQ_{mN} в (3.23) примет вид:

$$\Delta Q_{mN} = \Delta Q_m \left[1 - \left(\frac{m+1}{N+1} \right)^3 \right], \quad (3.28)$$

отсюда оценка действительной абсолютной погрешности ΔQ_m не составляет труда:

$$\Delta Q_m = \frac{(N+1)^3}{(N+1)^3 - (m+1)^3} \Delta Q_{mN} = C_{mN} \Delta Q_{mN}. \quad (3.29)$$

Достоинство этой формулы в том, что она допускает различное соотношение m и N (как $m < N$, так $m > N$), что учитывается коэффициентом C_{mN} . В предельном же случае, когда $N = 1$ (известны только нулевые скорости на урезах), для ЛД – модели расхода $Q_N = 0$ и, следовательно:

$$\Delta Q_m = C_{mN} Q_m = \frac{8}{8 - (m-1)^3} Q_N. \quad (3.30)$$

Представили относительную погрешность δQ_m в (3.21) приближенной зависимостью:

$$\delta Q_m \approx \frac{\Delta Q_m}{Q_m} = \frac{8}{8 - (m + 1)^3}. \quad (3.31)$$

Отметим, что δQ_m в (3.31) не зависит от N , что и должно наблюдаться по физическому смыслу погрешности измерения расхода при m отсеках сечения. С учетом (3.31) становится понятен вид формулы (3.13), используя которую для малых N_ϑ получим следующие значения коррективы K_m (таблица 3.1):

Таблица 3.1 – Значения коррективы K_m

N_ϑ	2	3	4	5
K_m	1,167	1,073	1,040	1,022

Возвращаясь к корреляционно-гидравлической модели расхода воды, определим Q_2 в (3.19) в форме упрощенной интерполяционно-гидравлической модели:

$$Q_2 = Q_{\text{уиг}} = \sum_{s=1}^N f_s \left(\frac{\vartheta_i + \vartheta_j}{h_i + h_j} \right) h_s, \quad (3.32)$$

где f_s и h_s – площадь и средняя глубина s – того отсека;

i и j – индексы, обозначающие скоростные вертикали на границах s – того отсека.

Что же касается определения весов a_1 и a_2 в формуле (3.18), то корреляционно – статистических характеристик z_{02}, J_{01}, J_1 требует ряда специальных высокоточных наблюдений, которые в каждом случае невозможны. Поэтому, исходя из физических соображений поставим a_1 и a_2 в зависимости от параметра согласованности ϑ, h - распределения $M_0 h$, который свяжет с оценкой коэффициента взаимной корреляции распределений ϑ и h по гидроствору следующим образом:

$$M_0 h = R_{\vartheta h}^2 = \left(\frac{\Delta \vartheta_i \Delta h_i}{\sigma_0 \sigma_n} \right)^2 ; \quad (3.33)$$

$$\Delta \vartheta_i = \vartheta_i - \bar{\vartheta} = \vartheta_i - \frac{1}{N_{\vartheta}} ;$$

$$\Delta h_i = h_i - \bar{h} = h_i - \frac{1}{N_{\vartheta}} \sum_{i=1}^{N_{\vartheta}} h_i ;$$

$$\sigma_{\vartheta} = \left(\frac{1}{N_{\vartheta}} \sum_{i=1}^{N_{\vartheta}} \Delta \vartheta_i^2 \right)^{1/2} ;$$

$$\sigma_n = \left(\frac{1}{N_{\vartheta}} \sum_{i=1}^{N_{\vartheta}} \Delta h_i^2 \right)^{1/2} ;$$

$$\overline{\Delta \vartheta_i \Delta h_i} = \frac{1}{N_{\vartheta}} \sum_{i=1}^{N_{\vartheta}} \Delta \vartheta_i \Delta h_i .$$

Примем $M_0 h$ в качестве оценки a_2 при $R_{\vartheta h}$ и зафиксируем $a_2 = 0$ при $R_{\vartheta h} < 0$;

$$\begin{aligned} a_1 &= 1 - a_2 ; \\ a_2 &= \begin{cases} R_{\vartheta h}^2 & \text{при } R_{\vartheta h} \geq 0 \\ 0 & \text{при } R_{\vartheta h} < 0 \end{cases} . \end{aligned} \quad (3.34)$$

Тем самым, корреляционно – гидравлическая модель оказывается полностью определенной:

$$Q = a_1 K_m Q_{\text{лд}} + a_2 Q_{\text{уиг}} , \quad (3.35)$$

где a_1 и a_2 вычисляются по (3.34).

3.4 Вероятностно – гидравлическая модель расхода воды

По предложению И.Ф. Карасева, введен параметр согласованности ϑ , h – распределения ($K_{\vartheta h}$) в следующей форме:

$$K_{\vartheta h} = \frac{1}{N_{\vartheta}} \sum_{i=1}^{N_{\vartheta}} |F_{\vartheta} - F_h|_i, \quad (3.36)$$

где F_{ϑ_i} и F_{h_i} – соответственно, функции распределения вероятностей скоростей и глубин, измеренных на i -той вертикали, которые определяются по методу геометрических вероятностей.

$$F_{\vartheta_i} = \left(\frac{\vartheta_i}{\vartheta_m} \right)^{1/m_{\vartheta}}; \quad (3.37)$$

$$F_{h_i} = \left(\frac{h_i}{h_m} \right)^{1/m_h}, \quad (3.38)$$

где ϑ_m и h_m – максимальные из скоростей и глубин на вертикали для данного измерения расхода воды;

m_{ϑ} и m_h – параметры формы функций распределения.

Для оценки m_{ϑ} и m_h И.Ф. Карасев предложил использовать метод максимального правдоподобия Фишера согласно которому (на примере m_{ϑ}) получили:

$$m_{\vartheta} = \arg \left(\max_{m_{\vartheta}} L \right) = \arg \left\{ \frac{\partial L}{\partial m_{\vartheta}} = 0 \right\}, \quad (3.39)$$

где L – функция максимального правдоподобия (3.40).

$$L = \ell_n(P_1 P_2 \dots P_{N_{\vartheta}}). \quad (3.40)$$

Вероятность P_i реализации скорости ϑ_i связана с функцией распределения F известным равенством:

$$P_i = F_{\vartheta}^{1/\vartheta} = \vartheta_i = \frac{1}{m_{\vartheta}} \left(\frac{\vartheta_i}{\vartheta_m} \right)^{\frac{1-m_{\vartheta}}{m_{\vartheta}}}. \quad (3.41)$$

Решение оптимизационной процедуры (3.39) с учетом (3.40) и (3.41) приводит к результату:

$$m_{\vartheta} = \frac{1}{N_{\vartheta}} \sum_{i=1}^{N_{\vartheta}} \ln \frac{\vartheta_m}{\vartheta_i}. \quad (3.42)$$

Из аналогических соображений для распределения глубин (3.38) получим:

$$m_{\vartheta} = \frac{1}{h_n} \sum_{i=1}^{h_n} \ln \frac{h_m}{h_i}, \quad (3.43)$$

где h_n – число промерных вертикалей в сечении.

Таким образом параметр согласованности ϑ , h – распределения K_{ϑ} , h однозначно определяется выражениями (3.36), (3.42), (3.43).

Далее предложено отождествить параметр K_{ϑ_h} с весовым коэффициентом a_1 в формуле (3.18) приняв в качестве a_1 расхода Q_1 расход $Q_{\text{ЛД}}$, вычисленный по традиционной линейно-детерминированной модели.

Таким образом, согласно (3.3) $a_2 = 1 - K_{\vartheta_h}$, и расчетное выражение вероятностно – гидравлической модели расхода приобретает вид:

$$Q = K_{\vartheta_h} Q_{\text{ЛД}} + (1 - K_{\vartheta_h}) Q_{\text{лиг}}. \quad (3.44)$$

4 РАСЧЕТНАЯ МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ

4.1 Анализ исходных данных

Ускорение измерений расхода воды при сохранении заданной точности результата – одна из важных задач речной гидрометрии, преследующая цель повышения производительности труда наблюдателей, оперативности и точности контроля за состоянием водных объектов. Экспресс методы, прежде всего, нацелены сложные условия измерений расхода воды: ледостав и суровые зимы, половодья и паводки, сплав леса и интенсивное судоходство при которых традиционные измерения гидрометрической вертушкой – (длительностью 1,5 – 2 и более часов) характеризуется снижением надежности и точности данных. В связи с этим, для исследования возможности перехода на ускоренные способы измерения расходов воды на реках России, нами были выбраны расходы воды, измеренные в период высокой и средней водности потоков.

Исследование всех известных видов моделей (средне–секционное, Гариехера) в дипломном проекте не проводилось, т.к. отделом гидрометрии ГГИ было проделана эта работа и указанные модели относятся к моделям низкой точности.

К рассмотрению и анализу приняты несколько моделей: ЛИГ – 2, УИГ, ЛДК, КРГ, ВРГ, позволяющие по измеренным глубинам, средней скорости и расстояниям от постоянного начала вычислить расходы воды. При этом ускорение наблюдений достигается посредством сокращения числа скоростных вертикалей в сечении потока в 1,5 – 2 раза. Таким образом, в данном проекте представлены расчеты для реки р. Пяку – Пур – г. Тарко – Сале.

На рисунке 4.1 представлен поперечный профиль гидроствора рассматриваемой реки с нанесенными эпюрами распределения средних скоростей по ширине потока при полном количестве скоростных вертикалей.

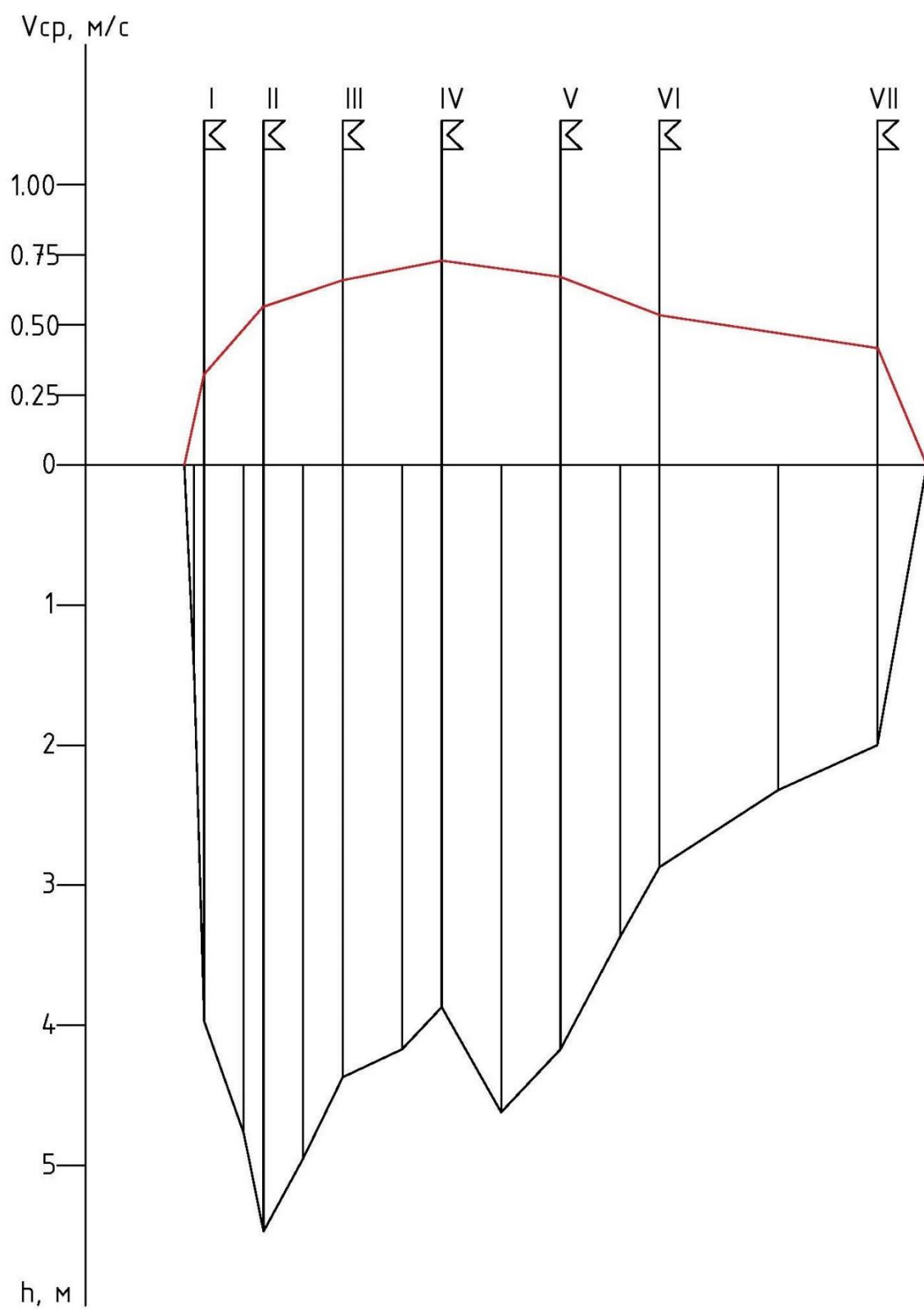


Рисунок 4.1 – Поперечный профиль гидрометрического створа,
р. Пяку – Пур – г. Тарко – Сале

4.2 Описание водомерного поста р. Пяку – Пур.

Гидрологический пост 1 разряда расположен в городе Тарко – Сале существует с 1 августа 1938 года. В 3,4 км. выше слияния рек Пяку – Пур и Айваседо – Пур, образующих р. Пур.

Координаты поста 64°55' с.ш. и 77°46' в.д.

Прилегающая местность – плоская заболоченная равнина, покрытая хвойным лесом.

Долина реки неясно выраженная. Склоны её пологие, сложены песчано-илистыми грунтами.

Пойма двухсторонняя, шириной 9 – 11 км, заболоченная, изрезана старицами, озёрами, поросшая кустарником и хвойным лесом.

Левобережная пойма сливается с поймой р. Хыльмиг – Яха, левого притока р. Пур, затопляется при уровне выше 970 см. над нулём поста. Правобережная пойма сливается ниже города Тарко – Сале с поймой р. Айваседа – Пур, затопляется при уровне 635 см. над нулём поста. На правом берегу на протяжении всего города дамба для предотвращения его затопления.

Русло реки песчаное, деформирующееся. Берега пологие, местами обрывистые, сложены песчано-илистыми грунтами, покрыты кустарником и лесом.

В устье реки, в 3,4 км. ниже поста расположен остров, способствующий образованию заторов льда.

Пост свайный, расположен на правом берегу. Отметка нуля поста с 26.06.1989 года 15.31 м БС – 77 вместо 15.25 м БС. До 26.06.1989 года пост находится в 0,5 км. ниже существующего. В 2,9 км выше устья р. Пяку – Пур. Перенесён в связи с обрушением берега. Отметка старого поста стала 15,27 м БС – 77. Отметка нуля нового поста назначена с учётом падения на участке между постами.

Наблюдения за уровнем воды на старом и новом постах увязаны. Уровень воды измеряется по стандартным водомерным рейкам заводского изготовления

с делениями через 1 см. За весь период наблюдений наивысший уровень был отмечен 1037 см в 1967 году, наименьший 545 см в 2012 году.

Гидроствор № 1 расположен в 2,0 км ниже нового поста, служит измерения расходов воды и взвешенных наносов в период половодья. Местоположение судна определяется секстантом или теодолитом.

Гидроствор № 4, меженный, совмещён с постом, служит для измерения расходов воды и взвешенных наносов при уровне ниже 700 см. над нулём поста. На гидростворах №2 и №3 измерения не производятся. Сток в пойме выше 830 см. не учитывается.

Единичные пробы воды на мутность не отбираются.

Температура воды – измеряется в створе водомерного поста у берега, термометром для измерения температуры воды ТМ–10, закреплённом в металлической оправе.

Глубина в месте измерения 0,5 м, участок проточный.

При измерении температуры воды в прибрежной полосе по мере падения уровня место измерения может постепенно передвигаться ближе к середине реки, а при повышении уровня - к берегу; место, выбранное на стрежне, остаётся в течение всего сезона наблюдений постоянным. Измерения температуры воды начинаются весной ещё при ледоставе, с наступлением оттепелей. В это время температура воды обычно бывает близка к точке её замерзания (0° С). Осень, с наступлением ледостава, после 3 – 5 суток измерений подо льдом наблюдения за температурой воды прекращаются.

Для измерения расхода оборудован один гидроствор находящийся в створе водомерного поста.

Расходы воды измеряются в летний период с катера, в зимний период со льда. Местоположение в летний период определяется GPS.

Толщина льда измеряется в створе поста, на середине реки каждые 5 дней.

Данные о температуре воздуха и осадков берутся на метеостанции Тарко – Сале.

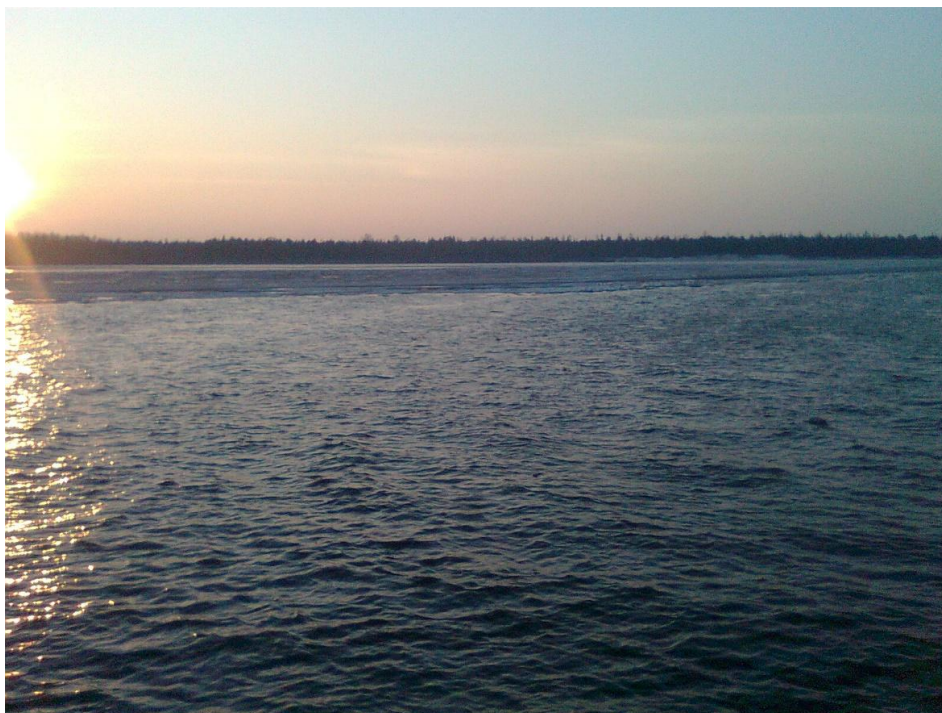


Рисунок 4.1 – р. Пяку – Пур – г. Тарко – Сале

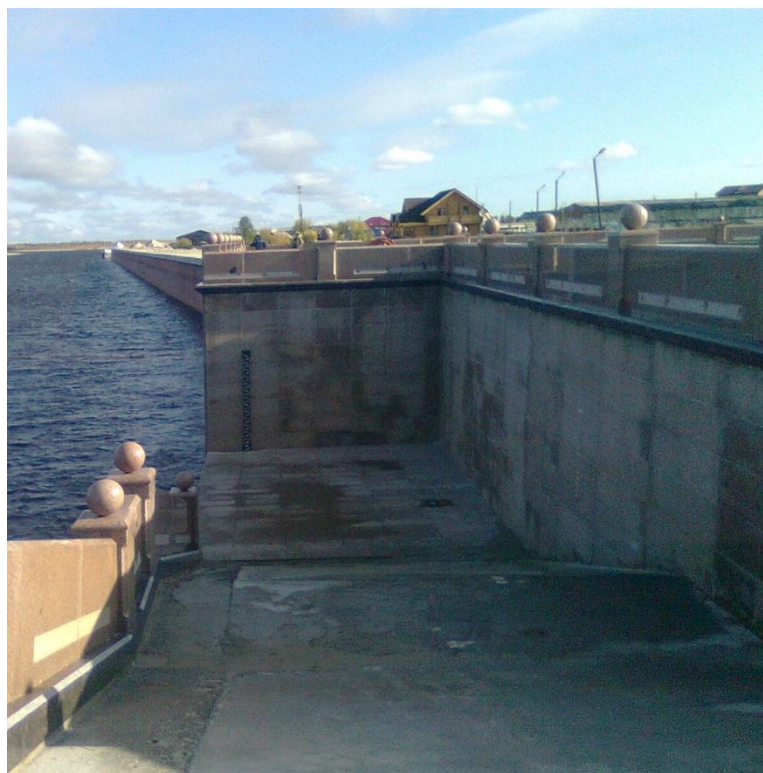


Рисунок 4.2 – Водомерное устройство, р. Пяку – Пур – г. Тарко – Сале

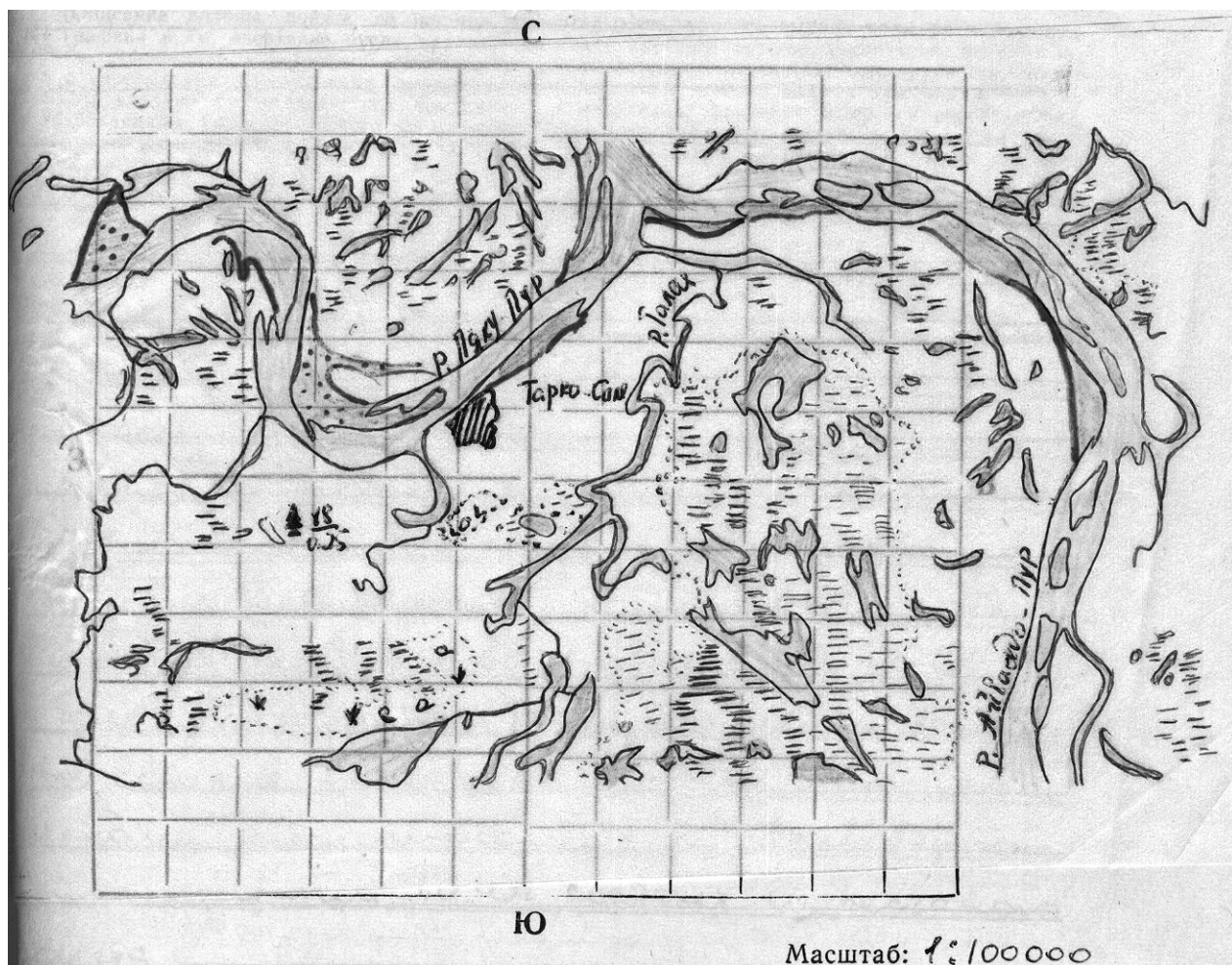


Рисунок 4.3 - Схема расположения гидрологического поста

4.3 Методика расчета расходов воды по интерполяционно – гидравлическим моделям

Все вычисления были произведены в программном комплексе Microsoft Office Excel.

Введем следующие обозначения:

- Q – расход воды;
- h_i – глубина потока на i -той вертикали;
- v_s – скорости потока на s -той вертикали;
- v_c – скорость потока на c -той вертикали (при сокращенном числе скоростных вертикалей k);
- i, s, c – индексы нумерации;

- ℓ_i – расстояние i -той вертикали от постоянного начала;
 $\bar{\vartheta}_s$ и $\bar{\vartheta}_c$ – средние скорости в отсеках между соответствующими вертикалями;
 f_i, f_s, f_c – площади живого сечения между соседними i -ми вертикалями;
 N_{ϑ} – полное (несокращенное) число скоростных вертикалей.

Эталонные расходы воды и расходы воды по ЛИГ и УИГ, ЛДК, КРГ, ВРГ, ЛДС – моделям рассчитывались по формулам:

$$Q_{\text{ЛД}} \sum_{s=1}^{N_{\vartheta+1}} f_s \bar{\vartheta}_s = \sum_{s=1}^{N_{\vartheta+1}} f_s P_s (\vartheta_{s-1} + \vartheta_s); \quad (4.1)$$

$$f_s = 0,5 \sum_{i,s-1}^{i,s} (\ell_{i+1} - \ell_i)(h_i + h_{i+1}); \quad (4.2)$$

$$P_s = \begin{cases} 0,5 & \text{при } 1 < S < N_{\vartheta+1} \\ P_1 & S = 1, \\ P_{N_{\vartheta+1}} & S = N_{\vartheta+1} \end{cases}$$

где P_1 и $P_{N_{\vartheta+1}}$ – береговые коэффициенты.

$$Q_{\text{ЛИГ}} = \sum_{c=1}^{k+1} f_s \bar{\vartheta}_s; \quad (4.3)$$

$$\bar{\vartheta}_c = ah_c^{2/3} + L_c \left(\vartheta_{sc+1} - ah_{ic-1}^{2/3} + \vartheta_{sc} - ah_{ic}^{2/3} \right), \quad (4.4)$$

где

$$a = \frac{1}{k} \sum_{c=1}^k \left(\vartheta_{sc} / h_{ic}^{2/3} \right);$$

$$h_c = \frac{f_s}{\ell_{ic} - \ell_{ic-1}};$$

$$f_s = 0,5 \sum_{i,s-1}^{i,s} (\ell_{i+1} - \ell_i)(h_i + h_{i+1}).$$

1) Упрощенная интерполяционно – гидравлическая модель

$$Q_{\text{уиг}} = \sum_{c=1}^{k+1} f_s \bar{\vartheta}_c = \sum_{c=1}^{k+1} f_c G_c (\vartheta_{sc-1} + \vartheta_{sc}); \quad (4.5)$$

$$G = \begin{cases} \frac{h_c}{h_{ic-1} + h_{ic}} & \text{при } 1 < c < k + 1 \\ L_1 & c = 1 \\ L_{k+1} & c = k + 1 \end{cases}$$

2) Линейно – детерминированная модель при сокращенном числе вертикалей ($K = 0,7$)

$$Q_{\text{лдс}} = k \vartheta_2 f_1 + \frac{\vartheta_2 + \vartheta_3}{2} f_{(2-3)} + \frac{\vartheta_3 + \vartheta_6}{2} f_{(3-6)} + k \vartheta_6 f_4 \quad (4.6)$$

3) Линейно – детерминированная модель с коррективом на уменьшенное число скоростных вертикалей

$$Q_{\text{лдж}} = \lambda Q_{\text{лдс}}, \quad (4.7)$$

где λ – в зависимости от количества вертикалей $\lambda_{k=3} = 1,073$, $\lambda_{k=4} = 1,040$, $\lambda_{k=5} = 1,022$.

4) Корреляционно – гидравлическая модель

$$Q_{\text{крп}} = \mathcal{A} Q_{\text{уиг}} + (1 - \mathcal{A}) Q_{\text{лдж}}; \quad (4.8)$$

$$\mathcal{A} = \begin{cases} R^2 & \text{при } R \geq 0 \\ 0 & R < 0 \end{cases},$$

где

$$R = \frac{\sum_{i=1}^k (\vartheta_{sc} - \vartheta_{cp}) (h_{sc} - h_{cp})}{\left[\sum_{c=1}^k (\vartheta_{sc} - \vartheta_{cp})^2 \sum_{c=1}^k (h_{ic} - h_{cp})^2 \right]^{0,5}}; \quad (4.9)$$

$$\vartheta_{cp} = \frac{\vartheta_1 + \vartheta_2 + \vartheta_3}{3};$$

$$h_{cp} = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{3}.$$

5) Вероятностно – гидравлическая модель

$$Q_{\text{ВРГ}} = EQ_{\text{ЛДС}} + (1 - E)Q_{\text{ЛИГ}}; \quad (4.10)$$

$$E = \frac{1}{k} \sum_{c=1}^k |(F_{\vartheta})_c - (F_h)_c|;$$

$$(F_{\vartheta})_c = [\vartheta_c (\max \vartheta_c)^{-1}]^{m_{\vartheta}^{-1}};$$

$$(F_h)_c = [h_{ic} (\max h_i)^{-1}]^{m_n^{-1}};$$

$$m_{\vartheta} = \frac{1}{k} \sum_{c=1}^k \ln[(\max \vartheta_c) \vartheta_c^{-1}];$$

$$m_n = \frac{1}{k} \ln[(\max h_c) h_c^{-1}].$$

Таблицы результатов расчетов расходов воды на основании ЛИГ, УИГ, КРГ, ВРГ, ЛДС – моделей для $N_{\vartheta} = 3$, $N_{\vartheta} = 4$ представлены в Приложении А.

Выбор скоростных вертикалей производится по следующим принципам:

1. Крайние из них назначаются на расстоянии $0,3B$ (если $k = 0,80$) и $0,4B$ (если $k = 0,7$); где B – ширина потока; третья вертикаль назначается в точке максимальной глубины; четвертая и пятая – в любой другой точке отсека, ограниченного крайними скоростными вертикалями. Расположение скоростных вертикалей, а также профиль глубин и распределение скоростей по ширине потока по 1 расходу воды для каждой реки используемых в расчетах.

2. Для каждого рассчитанного расхода воды определяется относительная погрешность единичного расхода:

$$\delta = \frac{Q - Q_0}{Q_0},$$

где Q_0 – расход, измеренный по ЛД – модели;

Q – расход, измеренный по ЛИГ, УИГ, ЛДК, КРГ, ВРГ моделям.

Удовлетворительным считается расход воды, если $\delta_a \leq 5\%$ и $\tilde{m}_a \leq 2\%$.

3. Для оценки методики расчета по этим моделям рассчитываются следующие характеристики [17]:

- Для математического ожидания погрешности расчета

$$\tilde{m}_Q = \frac{1}{N} \sum_i^N \delta Q \quad (4.11)$$

- Суммарная относительная среднеквадратическая погрешность

$$\tilde{\sigma}_a = \left(\frac{1}{N-1} \sum_i^N (\delta Q)_i^2 \right)^{0,5}, \quad (4.12)$$

где δQ_i – относительная погрешность расчета расхода воды;

N – длина выборки.

Статистические характеристики в полном объеме при всех возможных вариантах назначения скоростных вертикалей были рассчитаны по реке Пяку – Пур – г. Тарко – Сале.

Анализ результатов показал нецелесообразность расчета всех вариантов назначения скоростных вертикалей.

4. С целью устранения влияния местных факторов на качество экспресс-измерений рассчитали обобщенные характеристики точности (для $k = 3, k = 4$)

$$\langle \tilde{\delta}_a \rangle = \frac{\sum_{j=1}^n \left((\tilde{\delta} Q^2 N)_j \right)^{0,5}}{\sum_{j=1}^n N_j}; \quad (4.13)$$

$$\langle \sigma_a \rangle = \left(\left(\langle \delta_Q \rangle^2 - \langle \tilde{m}_Q \rangle^2 \right) \right)^{0,5}; \quad (4.14)$$

$$\langle \tilde{m}_Q \rangle = \frac{\sum_{j=1}^n (\tilde{m}_Q N)_j}{\sum_{j=1}^n N_j}, \quad (4.15)$$

где j – номер варианта распределения вертикалей;

n – число вариантов.

Результаты вычислений представлены в таблицах 4.1 – 4.2.

Для сравнения, в таблице 4.1 и Приложении А представлены результаты вычислений расходов воды по ЛИГ – моделям при правильном выборе скоростных вертикалей и одного из вариантов неправильного назначения скоростных вертикалей.

Таблица 4.1 – Средние, суммарные, случайные и экстремальные погрешности вычисления расходов воды при экспресс – измерениях по ЛИГ, ВРГ, КРГ, ЛДС, ЛДК – моделей в %

Река-пост	К	%	ЛИГ	ЛДС	ЛДК	УИГ	КРГ	ВРГ
р. Пяку – Пур – г. Тарко – Сале (Вертикали №2, 4, 6)	3	$\langle \tilde{\delta} \rangle$	0,92	0,42	0,35	0,43	0,42	0,65
		$\langle \tilde{m} \rangle$	4,96	1,96	1,89	1,97	1,83	1,88
		$\langle \tilde{\sigma} \rangle$	5,13	2,59	2,63	2,99	2,51	4,94
пределы		δQ	9,31	3,87	6,66	4,30	4,15	3,12
			2,92	0,01	0,01	0,08	0,22	0,04
р. Пяку – Пур – г. Тарко – Сале (Вертикали №2, 5, 7)	3	$\langle \tilde{\delta} \rangle$	0,97	0,73	1,32	1,80	1,61	1,43
		$\langle \tilde{m} \rangle$	5,17	3,92	7,06	9,59	8,61	7,61
		$\langle \tilde{\sigma} \rangle$	6,26	4,18	7,49	10,0	9,04	8,14
пределы		δQ	13,1	7,40	12,6	19,0	15,4	12,5
			0,09	1,47	2,71	5,81	3,14	0,76

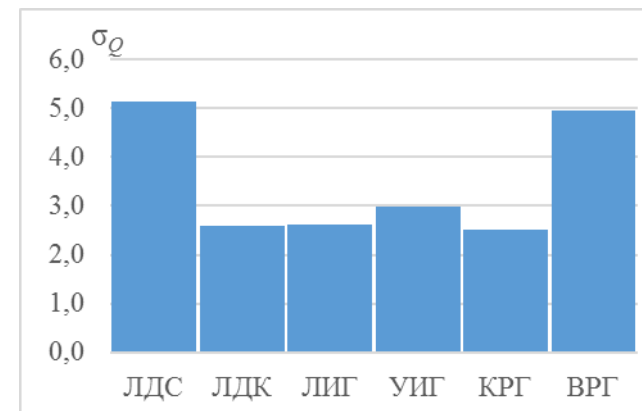
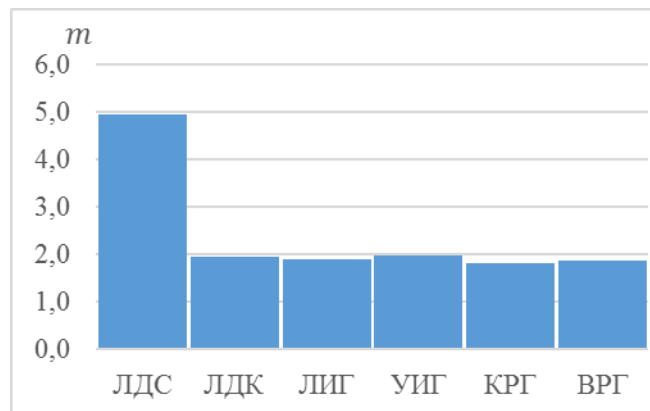
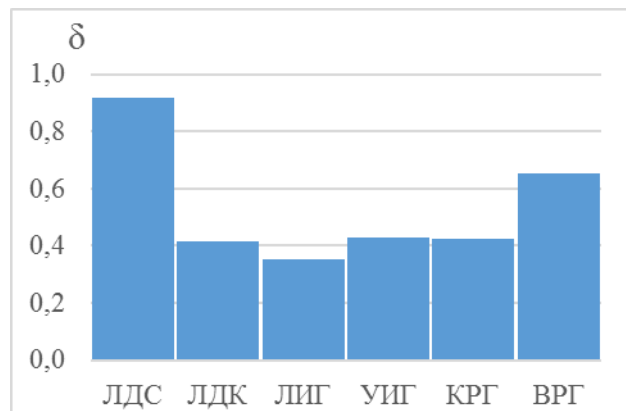
Таблица 4.2 – Средние, суммарные, случайные и экстремальные погрешности вычисления расходов воды при экспресс – измерениях по ЛИГ, ВРГ, КРГ, ЛДС, ЛДК – моделей в %

Река-пост	К	%	ЛИГ	ЛДС	ЛДК	УИГ	КРГ	ВРГ
р. Пяку – Пур – г. Тарко – Сале (Вертикали №2, 4, 6, 7)	4	$\langle \tilde{\delta} \rangle$	0,18	0,43	0,22	0,31	0,37	0,16
		$\langle \tilde{m} \rangle$	1,93	1,83	1,44	1,57	1,48	1,02
		$\langle \tilde{\sigma} \rangle$	1,34	2,92	1,68	2,35	2,64	1,23
пределы		δQ	2,99	3,13	4,40	5,65	6,87	3,03
			0,83	0,89	0,11	0,02	0,04	0,02

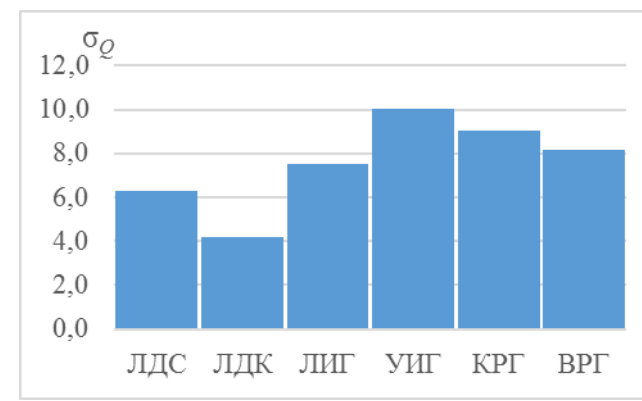
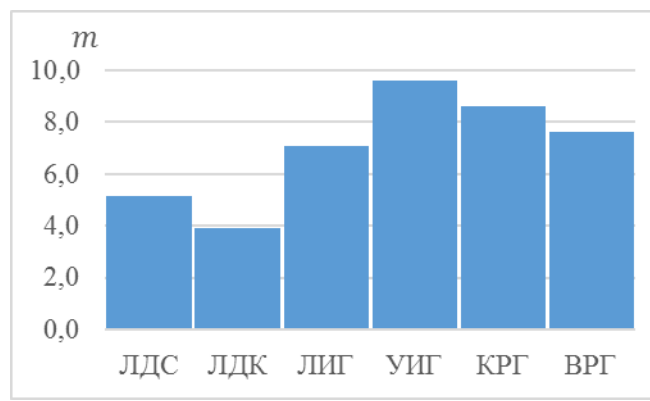
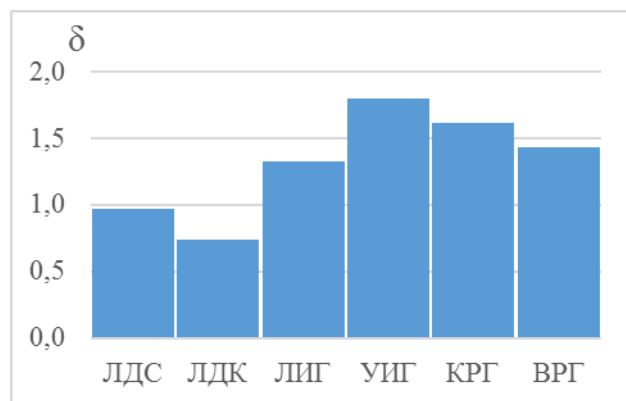
По данным таблиц 4.1 – 4.2 были построены диаграммы распределения обобщенных характеристик точности моделей вычисления расхода воды (рисунок 4.3).

На рисунке 4.3: I – скоростные вертикали №2, 4, 6; II – скоростные вертикали №2, 5, 7; III – скоростные вертикали №2, 4, 6, 7.

I



II



III

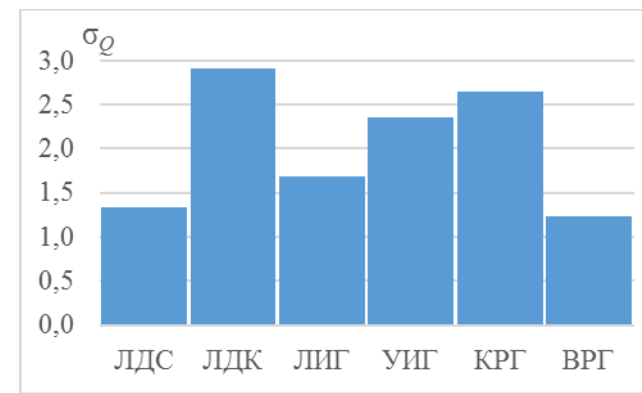
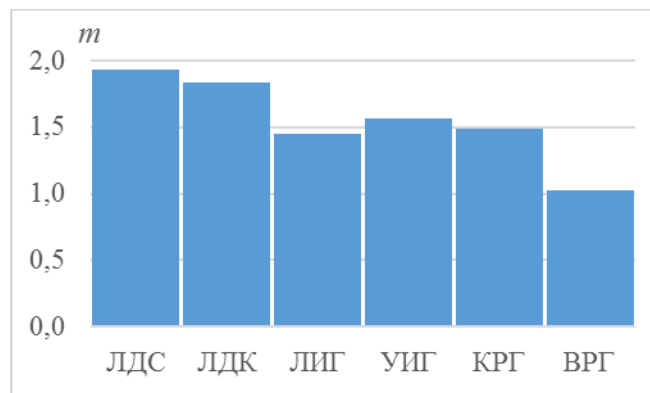
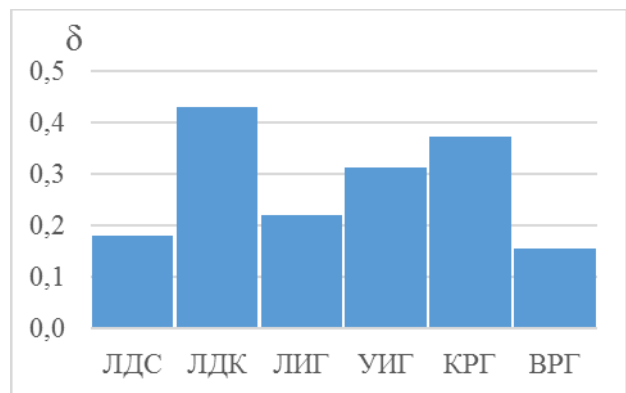


Рисунок 4.3 - Диаграммы распределения обобщенных характеристик точности моделей вычисления расхода воды

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Первоначальный анализ расчетных данных производился по значениям $\delta\tilde{Q}$ и $\tilde{m}_Q$, которые рассчитывались по формулам (4.11) и (4.12). Как уже отмечалось, если $\sigma_Q \geq 5\%$ и $\tilde{m}_Q \geq 2\%$, то эти значения считаются неудовлетворительными. Сначала производится анализ всех вариантов назначений скоростных вертикалей, по ЛИГ, УИГ, ЛДК, КРГ, ВРГ – моделями к расчету принимаются варианты с заведомо удовлетворительными погрешностями наиболее оптимальным расположением скоростных вертикалей, назначенных согласно наставлений. Далее рассчитываются обобщенные характеристики точности по формулам (4.13 – 4.15). Результаты вычислений даны в таблицах 4.1 – 4.2.

Как видно из таблицы для реки Пяку – Пур – г. Тарко – Сале при сокращении вертикалей до 3, наилучшие результаты получались по ЛДК, ЛИГ, УИГ, КРГ и ВРГ – моделям, где $\sigma < 5\%$, $m < 2\%$, $\sigma_Q < 5\%$.

В виду простоты вычислений, так как по точности они почти равнозначны, можно рекомендовать ЛИГ и КРГ модели. Сокращение вертикалей до 4 еще более повышают точность. Рекомендованные вертикали, на которых необходимо производить измерения скорости 2, 4, 6 и 2, 4, 6, 7.

ВЫВОДЫ

1. Проведенные расчеты и анализ полученных результатов показал, что все исследуемые модели можно разделить на 3 группы:

- 1) Группа – сравнительно высокой точности – ВРГ, КРГ, ЛИГ.
- 2) Группа средней точности – УИГ, ЛДК.
- 3) Группа низкой точности – ЛДС.

2. Эти модели имеют ряд существенных преимуществ перед ЛД – моделью, так как:

- Аналитическое описание моделей относительно не сложное (хотя они отличаются более сложными вычислительными работами с ЛД – моделью), что не усложняет массовые расчеты по ним при наличии персональных компьютеров;
- Предполагаемые модели не требуют данных, предшествующих наблюдений или какую – либо дополнительную информацию.

Так по исследуемой реке были получены следующие характеристики точности

Река – пост	К	%	ЛИГ	ЛДС	ЛДК	УИГ	КРГ	ВРГ
р. Пяку – Пур – г. Тарко – Сале	3	$\langle \tilde{\delta} \rangle$	0,92	0,42	0,35	0,43	0,42	0,65
		$\langle \tilde{m} \rangle$	4,96	1,96	1,89	1,97	1,83	1,88
		$\langle \tilde{\sigma} \rangle$	5,13	2,59	2,63	2,99	2,51	4,94
пределы		δQ	9,31	3,87	6,66	4,30	4,15	3,12
			2,92	0,01	0,01	0,08	0,22	0,04
р. Пяку – Пур – г. Тарко – Сале	4	$\langle \tilde{\delta} \rangle$	0,18	0,43	0,22	0,31	0,37	0,16
		$\langle \tilde{m} \rangle$	1,93	1,83	1,44	1,57	1,48	1,02
		$\langle \tilde{\sigma} \rangle$	1,34	2,92	1,68	2,35	2,64	1,23
пределы		δQ	2,99	3,13	4,40	5,65	6,87	3,03
			0,83	0,89	0,11	0,02	0,04	0,02

3. На основе проведенных исследований и расчетов по р. Пяку – Пур – г. Тарко – Сале рекомендуем при переходе на экспресс – методы измерения расхода воды следующие скоростные вертикали:

Река – пост	$K = 3$	$K = 4$
р. Пяку – Пур – г. Тарко – Сале	2 4 6	2 4 6 7

4. Анализ полученных результатов показал, что модель ВРГ имеет неоспоримое преимущество по точности перед конкурирующими моделями практически для любого сокращения количества вертикалей и любого поста, а модель ЛДК – удобную в вычислительном отношении как средство оперативного контроля измерения расхода воды.

5. Погрешность при измерении расхода воды определяется сочетанием следующих основных факторов:

- 1) используемые модели вычисляют расход воды;
- 2) количеством скоростных вертикалей;
- 3) расположением скоростных вертикалей по ширине потока;
- 4) степенью соответствия эпюры средних скоростей профилю живого сечения в гидростворе;
- 5) морфология живого сечения русла и кинематическая структура потока;
- 6) погрешностями измерений;
- 7) состоянием водотока.

6. При переходе на экспресс – измерения на указанном посту необходимо в различные периоды водности осуществлять контроль путем измерения расхода воды детальным или основным способом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Буравлев Е.П. «Упрощённый способ измерения расхода воды на судоходных реках» - инф. письмо УГМС. 1975, №2 С.12-14
2. Великанов М.А. «Динамика русловых потоков» М., Гостехиздат, 1954 с. 232
3. Васильев А.В., Быков В.Д. «Гидрометрия» – Л. Гидрометиздат, 1991
4. Дементьев В.В., Федоров Н.Н. «К вопросу о выборе формулы для вычисления средней скорости течения по вертикали» - Труды ГГИ, 1976. вып. 2,3 с. 119 - 126.
5. Железняков Г.В. «Теория гидрометрии». Л. Гидрометиздат.
6. Железняков Г.В. «Пропускная способность русел, каналов и рек» - Л. Гидрометиздат. 1981, с. 312.
7. Известия ГГИ 1922 №4.
8. Караушев А.В. «Проблемы динамики естественных водных потоков» - Л. Гидрометеиздат. 1960, с. 393.
9. Караушев А.В. «Речная гидравлика» - Л. Гидрометиздат. 1969, с. 416.
10. Карасев И.Ф. «Модели расхода воды и погрешности его измерения методом «скорость-площадь» - Труды ГГИ. 1978 вып.256, с. 78 - 109.
11. Карасев И.Ф. «Речная гидрометрия и учет водных ресурсов» - Л. Гидрометиздат.1980, с. 310.
12. Карасев И.Ф., Шумков И.Г. «Гидрометрия» - Л.Гидрометиздат.1985, с. 384.
13. Наставление по гидрометеостанциям и постам - вып. 6 ч. 2 - Л. Гидрометиздат.1972, с. 266.
14. Розенберг В.Д. «Введение в теорию точности измерительных систем» - М. Советское радио, 1975, с. 303.

15. Сергутин В.Е. «О гидравлично – гидрометрическом способе определения расхода воды в открытых потоках» - Метеорология и гидрология 1976, №6 с.72-76.

16. Ременюк В.А. «Об ускоренных измерениях расхода воды на основе корреляционно-гидравлической модели» - Метеорология и гидрология 1989, №5 с. 90-96.

17. Ременюк В.А., Серяков А.Е. «Анализ характеристик точности вычисления расхода воды при экспресс-измерениях» - Метеорология и гидрология 1991, №7 с. 86-93.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Результаты расчетов расходов воды по ЛД и ЛИГ – моделям и их погрешности

р. Пяку – Пур – г. Тарко – Сале

(Скоростные вертикали №2, 4, 6)

№ п/п	Дата	Значения								Погрешности						
		$Q_{\text{выч}}$	ЛДС	ЛДК	ЛИГ	УИГ	КРГ	ВРГ	ГД	ЛДС	ЛДК	ЛИГ	УИГ	КРГ	ВРГ	ГД
1	27.05.2013	1409	1365	1461	1412	1406	1432	1378	1282	3,11	3,67	0,21	0,17	1,62	2,19	8,99
2	29.05.2013	1346	1274	1363	1315	1313	1335	1310	1191	5,32	1,31	2,29	2,44	0,80	2,64	11,5
3	31.05.2013	1257	1207	1292	1246	1245	1270	1226	1129	3,97	2,76	0,90	0,98	1,05	2,48	10,2
4	03.06.2013	1228	1176	1258	1215	1211	1235	1199	1097	4,30	2,40	1,10	1,43	0,58	2,39	10,7
5	05.06.2013	1194	1147	1227	1183	1177	1202	1158	1075	3,92	2,81	0,94	1,37	0,67	3,00	9,95
6	07.06.2013	1123	1079	1154	1123	1114	1125	1096	998	3,94	2,79	0,01	0,77	0,22	2,40	11,1
7	11.06.2013	988	952	1018	986	990	1007	963	886	3,71	3,03	0,22	0,15	1,88	2,56	10,3
8	13.06.2013	906	871	932	903	908	925	880	812	3,87	2,86	0,28	0,27	2,08	2,87	10,4
9	01.07.2013	639	615	658	647	653	653	620	578	3,70	3,04	1,36	2,24	2,25	2,92	9,56
10	24.07.2013	409	394	422	416	420	417	397	364	3,58	3,17	1,84	2,69	1,94	2,88	11,0
11	01.08.2013	352	333	356	373	363	361	352	290	5,52	1,10	5,92	3,03	2,38	0,04	17,6
12	19.08.2013	311	293	313	332	321	318	313	254	5,79	0,80	6,66	3,28	2,36	0,70	18,3
13	12.09.2013	249	226	241	256	251	245	244	196	9,31	2,97	2,91	0,92	1,61	1,94	21,3
14	26.09.2013	246	228	244	259	253	248	242	198	7,23	0,74	5,30	3,05	0,74	1,55	19,5
15	05.10.2013	285	268	286	302	297	292	280	232	5,93	0,65	6,16	4,27	2,44	1,62	18,4
16	28.05.2014	2873	2720	2911	2908	2780	2786	2784	2377	5,31	1,31	1,21	3,23	3,03	3,09	17,3
17	03.06.2014	2763	2614	2797	2803	2694	2696	2678	2275	5,40	1,23	1,43	2,50	2,44	3,09	17,7
18	06.06.2014	2685	2548	2727	2723	2617	2618	2602	2230	5,09	1,55	1,41	2,55	2,50	3,09	16,9
19	10.06.2014	2477	2345	2510	2503	2403	2399	2400	2062	5,32	1,31	1,03	2,99	3,14	3,12	16,7
20	15.06.2014	1974	1870	2001	1993	1925	1921	1914	1649	5,25	1,39	0,99	2,45	2,65	3,03	16,5

№ п/п	Дата	Значения								Погрешности						
		$Q_{\text{выч}}$	ЛДС	ЛДК	ЛИГ	УИГ	КРГ	ВРГ	ГД	ЛДС	ЛДК	ЛИГ	УИГ	КРГ	ВРГ	ГД
21	19.06.2014	1223	1143	1223	1231	1201	1219	1196	997	6,55	0,01	0,68	1,75	0,35	2,20	18,4
22	24.06.2014	932	866	927	935	919	921	912	759	7,09	0,58	0,30	1,44	1,18	2,16	18,5
23	02.07.2014	699	662	708	740	724	711	707	557	5,32	1,31	5,89	3,58	1,74	1,11	20,3
24	15.07.2014	630	588	630	658	657	637	633	495	6,60	0,06	4,48	4,30	1,10	0,53	21,5
25	23.07.2014	575	536	573	578	586	576	565	474	6,78	0,26	0,55	1,95	0,24	1,59	17,5
26	05.08.2014	509	474	507	513	523	511	501	418	6,80	0,27	0,88	2,76	0,33	1,61	17,9
27	19.08.2014	447	419	448	454	465	456	445	369	6,44	0,11	1,59	3,89	1,85	0,48	17,4
28	01.09.2014	421	389	417	424	435	424	416	343	7,40	0,92	0,78	3,40	0,77	1,22	18,4
29	29.09.2014	684	647	693	695	704	694	679	577	5,38	1,24	1,62	2,89	1,52	0,75	15,6
30	08.10.2014	620	584	624	629	640	627	613	518	5,85	0,74	1,47	3,16	1,10	1,18	16,4
31	25.05.2015	702	677	724	727	718	722	705	596	3,56	3,19	3,56	2,28	2,85	0,43	15,1
32	01.06.2015	2023	1943	2079	2093	2029	2107	2032	1759	3,95	2,77	3,46	0,30	4,15	0,44	13,0
33	10.06.2015	1319	1275	1364	1324	1320	1364	1301	1180	3,34	3,43	0,38	0,08	3,41	1,36	10,5
34	15.06.2015	1083	1033	1105	1072	1065	1105	1054	958	4,62	2,06	1,02	1,66	2,03	2,68	11,5
35	22.06.2015	894	859	919	893	885	917	879	794	3,91	2,81	0,11	1,01	2,57	1,68	11,2
36	29.06.2015	726	698	747	727	717	742	714	648	3,86	2,87	0,14	1,24	2,20	1,65	10,7
37	17.07.2015	739	704	753	728	731	751	719	660	4,74	1,93	1,49	1,08	1,62	2,71	10,7
38	27.07.2015	667	646	691	644	641	670	650	645	3,15	3,63	3,45	3,90	0,45	2,55	3,30
39	03.08.2015	708	687	735	707	709	733	699	648	2,97	3,83	0,14	0,14	3,53	1,27	8,47
40	21.08.2015	550	527	564	544	546	560	537	495	4,18	2,53	1,09	0,73	1,82	2,36	10,0
41	07.09.2015	605	580	621	602	600	617	593	545	4,13	2,58	0,50	0,83	1,98	1,98	9,92
42	17.09.2015	684	664	710	708	685	708	687	590	2,92	3,87	3,51	0,15	3,51	0,44	13,7
43	29.09.2015	691	661	707	705	682	704	686	586	4,34	2,35	2,03	1,30	1,88	0,72	15,2

(Скоростные вертикали №2, 5, 7)

№ п/п	Дата	Значения								Погрешности						
		Q _{выч}	ЛДС	ЛДК	ЛИГ	УИГ	КРГ	ВРГ	ГД	ЛДС	ЛДК	ЛИГ	УИГ	КРГ	ВРГ	ГД
1	27.05.2013	1409	1266	1358	1326	1299	1316	1311	1212	10,1	3,59	5,92	7,78	6,58	6,92	14,0
2	29.05.2013	1346	1217	1306	1277	1246	1275	1260	1170	9,52	2,91	5,13	7,37	5,22	6,36	13,1
3	31.05.2013	1257	1119	1201	1171	1141	1170	1156	1079	11,0	4,48	6,86	9,22	6,91	8,02	14,2
4	03.06.2013	1228	1099	1179	1145	1115	1147	1132	1065	10,6	4,03	6,79	9,20	6,62	7,83	13,3
5	05.06.2013	1194	1074	1152	1120	1091	1117	1108	1039	10,1	3,49	6,19	8,58	6,40	7,21	12,9
6	07.06.2013	1123	994	1067	1032	1005	1026	1023	966	11,5	4,99	8,06	10,5	8,62	8,90	13,9
7	11.06.2013	988	870	933	919	893	908	906	835	12,0	5,57	6,99	9,65	8,15	8,27	15,5
8	13.06.2013	906	787	845	835	808	824	822	758	13,1	6,77	7,85	10,9	9,10	9,25	16,4
9	01.07.2013	639	613	658	607	580	593	584	533	3,97	3,05	5,03	9,12	7,12	8,62	16,6
10	24.07.2013	409	393	421	397	383	392	384	347	3,95	3,07	2,96	6,20	4,06	6,06	15,1
11	01.08.2013	352	338	363	339	327	335	327	294	3,94	3,08	3,84	7,13	4,97	7,18	16,5
12	19.08.2013	311	299	320	296	286	293	285	255	3,93	3,09	4,70	8,03	5,85	8,27	17,9
13	12.09.2013	249	239	257	233	224	230	223	197	3,91	3,10	6,51	9,93	7,72	10,6	20,8
14	26.09.2013	246	236	253	230	221	227	220	194	3,91	3,11	6,62	10,0	7,83	10,7	21,0
15	05.10.2013	285	273	293	269	260	266	259	231	3,92	3,09	5,37	8,73	6,54	9,12	19,0
16	28.05.2014	2873	2867	3076	2795	2685	2686	2851	2963	0,20	7,09	2,71	6,55	6,52	0,76	3,14
17	03.06.2014	2763	2738	2938	2650	2536	2538	2707	2866	0,91	6,32	4,12	8,23	8,14	2,04	3,70
18	06.06.2014	2685	2638	2830	2560	2454	2460	2620	2747	1,76	5,41	4,66	8,61	8,38	2,43	2,32
19	10.06.2014	2477	2445	2624	2377	2277	2279	2425	2544	1,28	5,92	4,04	8,07	8,00	2,09	2,69
20	15.06.2014	1974	1956	2099	1899	1815	1815	1930	2042	0,91	6,32	3,77	8,05	8,04	2,19	3,47
21	19.06.2014	1223	1181	1268	1130	1071	1093	1140	1269	3,40	3,66	7,63	12,44	10,6	6,75	3,77
22	24.06.2014	932	933	1001	875	821	829	887	1033	0,09	7,40	6,17	11,91	11,1	4,84	10,82
23	02.07.2014	699	682	732	666	652	622	668	770	2,47	4,65	4,79	6,66	10,9	4,49	10,14
24	15.07.2014	630	613	658	593	586	558	593	701	2,68	4,42	5,84	7,04	11,4	5,83	11,2
25	23.07.2014	575	558	599	535	532	507	534	645	2,90	4,19	6,87	7,40	11,8	7,13	12,3
26	05.08.2014	509	493	528	466	468	446	463	579	3,21	3,86	8,38	7,95	12,4	9,04	13,8
27	19.08.2014	447	431	463	402	409	388	397	517	3,58	3,46	10,2	8,60	13,2	11,3	15,6
28	01.09.2014	421	405	434	374	383	363	368	490	3,78	3,24	11,1	8,94	13,6	12,5	16,6

№ п/п	Дата	Значения								Погрешности						
		$Q_{\text{выч}}$	ЛДС	ЛДК	ЛИГ	УИГ	КРГ	ВРГ	ГД	ЛДС	ЛДК	ЛИГ	УИГ	КРГ	ВРГ	ГД
29	29.09.2014	684	667	716	650	638	609	651	755	2,51	4,61	5,00	6,73	11,0	4,76	10,4
30	08.10.2014	620	603	647	583	576	549	582	690	2,72	4,38	6,02	7,10	11,5	6,04	11,4
31	25.05.2015	702	667	713	639	632	653	639	655	5,04	1,61	8,93	9,95	7,03	8,94	6,71
32	01.06.2015	2023	1822	1955	1769	1683	1787	1786	1921	9,94	3,36	12,6	16,8	11,7	11,7	5,04
33	10.06.2015	1319	1207	1295	1172	1112	1164	1182	1274	8,49	1,82	11,1	15,7	11,8	10,4	3,41
34	15.06.2015	1083	985	1057	957	906	951	965	1042	9,05	2,40	11,6	16,3	12,2	10,9	3,79
35	22.06.2015	894	806	865	834	952	945	841	764	9,84	3,26	6,71	6,49	5,70	5,93	14,5
36	29.06.2015	726	706	758	654	588	614	664	836	2,75	4,41	9,92	19,0	15,4	8,54	15,2
37	17.07.2015	739	699	750	655	647	671	652	748	5,43	1,47	11,3	12,5	9,27	11,7	1,19
38	27.07.2015	667	636	683	603	598	618	599	683	4,62	2,34	9,61	10,4	7,34	10,2	2,41
39	03.08.2015	708	672	721	633	626	648	629	720	5,10	1,82	10,6	11,6	8,49	11,1	1,68
40	21.08.2015	550	534	573	518	518	533	512	578	2,84	4,25	5,88	5,81	3,14	6,96	5,06
41	07.09.2015	605	582	625	558	556	573	553	627	3,76	3,26	7,81	8,18	5,32	8,66	3,68
42	17.09.2015	684	651	699	615	609	630	611	669	4,83	2,12	10,0	10,9	7,84	10,6	2,15
43	29.09.2015	691	670	719	642	607	643	649	720	3,04	4,05	7,09	12,2	6,95	6,08	4,20

(Скоростные вертикали №2, 4, 6, 7)

№ п/п	Дата	Значения								Погрешности						
		$Q_{\text{выч}}$	ЛДС	ЛДК	ЛИГ	УИГ	КРГ	ВРГ	ГД	ЛДС	ЛДК	ЛИГ	УИГ	КРГ	ВРГ	ГД
1	27.05.2013	1409	1371	1426	1430	1447	1434	1424	1352	2,69	1,21	1,48	2,71	1,78	1,10	4,02
2	29.05.2013	1346	1315	1368	1335	1358	1354	1331	1260	2,27	1,64	0,79	0,90	0,62	1,09	6,32
3	31.05.2013	1257	1244	1293	1264	1283	1279	1259	1190	1,07	2,89	0,53	2,08	1,75	0,16	5,30
4	03.06.2013	1228	1210	1259	1231	1248	1244	1226	1160	1,47	2,47	0,20	1,56	1,24	0,20	5,59
5	05.06.2013	1194	1173	1220	1197	1211	1208	1193	1133	1,75	2,18	0,30	1,44	1,19	0,06	5,07
6	07.06.2013	1123	1111	1155	1135	1146	1142	1130	1071	1,06	2,89	1,10	2,01	1,66	0,66	4,67
7	11.06.2013	988	974	1013	1001	1014	1005	994	926	1,41	2,54	1,29	2,66	1,69	0,61	6,26
8	13.06.2013	906	888	924	917	928	917	910	843	1,98	1,94	1,27	2,38	1,18	0,47	6,97
9	01.07.2013	639	621	645	650	643	629	631	686	2,83	1,06	1,78	0,70	1,50	1,27	7,39
10	24.07.2013	409	402	418	412	409	391	403	440	1,65	2,28	0,77	0,02	4,36	1,49	7,67
11	01.08.2013	352	347	361	353	351	332	347	379	1,51	2,43	0,32	0,35	5,64	1,51	7,57
12	19.08.2013	311	302	314	310	309	289	306	335	2,83	1,05	0,11	0,66	6,87	1,55	7,78
13	12.09.2013	249	243	253	246	246	241	245	269	2,35	1,56	1,03	1,32	3,15	1,54	8,10
14	26.09.2013	246	239	249	243	242	234	243	264	2,77	1,12	1,09	1,37	4,81	1,15	7,40
15	05.10.2013	285	279	290	283	282	271	281	312	1,97	1,95	0,45	0,91	4,78	1,27	9,65
16	28.05.2014	2873	2805	2917	2944	2956	2910	2948	2648	2,36	1,54	2,48	2,89	1,28	2,61	7,82
17	03.06.2014	2763	2687	2794	2780	2766	2758	2696	2529	2,77	1,12	0,58	0,08	0,20	2,46	8,48
18	06.06.2014	2685	2620	2725	2713	2691	2684	2636	2477	2,40	1,50	1,03	0,22	0,04	1,82	7,73
19	10.06.2014	2477	2418	2515	2498	2478	2470	2445	2291	2,38	1,52	0,84	0,03	0,28	1,29	7,51
20	15.06.2014	1974	1924	2001	1991	1982	1973	1957	1817	2,49	1,41	0,89	0,40	0,04	0,85	7,96
21	19.06.2014	1223	1199	1247	1240	1260	1244	1229	1120	1,92	2,01	1,43	3,05	1,71	0,46	8,38
22	24.06.2014	932	904	940	941	959	942	931	839	2,99	0,89	0,94	2,87	1,04	0,10	9,95
23	02.07.2014	699	685	712	707	719	708	700	634	2,01	1,91	1,15	2,79	1,29	0,11	9,23
24	15.07.2014	630	617	642	637	644	636	631	570	1,97	1,95	1,13	2,24	0,97	0,23	9,43
25	23.07.2014	575	563	586	579	590	576	575	517	1,94	1,98	0,78	2,70	0,26	0,02	9,92
26	05.08.2014	509	499	519	515	522	512	512	459	1,89	2,03	1,21	2,59	0,62	0,63	9,79
27	19.08.2014	447	436	453	453	456	448	451	404	2,54	1,36	1,26	1,93	0,14	0,90	9,69
28	01.09.2014	421	411	427	427	426	420	426	379	2,29	1,62	1,51	1,28	0,15	1,27	9,99

№ п/п	Дата	Значения								Погрешности						
		$Q_{\text{выч}}$	ЛДС	ЛДК	ЛИГ	УИГ	КРГ	ВРГ	ГД	ЛДС	ЛДК	ЛИГ	УИГ	КРГ	ВРГ	ГД
29	29.09.2014	684	670	697	695	697	690	688	623	2,00	1,92	1,61	1,90	0,88	0,59	8,85
30	08.10.2014	620	608	632	631	634	626	625	565	1,97	1,95	1,79	2,27	0,98	0,89	8,86
31	25.05.2015	702	689	717	718	706	702	708	659	1,83	2,09	2,24	0,64	0,07	0,89	6,15
32	01.06.2015	2023	1988	2068	2079	2050	2056	2050	1890	1,73	2,20	2,77	1,33	1,63	1,33	6,57
33	10.06.2015	1319	1308	1360	1377	1362	1357	1359	1246	0,83	3,13	4,40	3,26	2,88	3,03	5,53
34	15.06.2015	1083	1058	1100	1092	1082	1078	1081	998	2,31	1,60	0,83	0,09	0,46	0,18	7,85
35	22.06.2015	894	885	920	921	916	910	913	845	1,01	2,95	3,02	2,46	1,79	2,13	5,48
36	29.06.2015	726	719	748	713	685	699	717	764	0,96	3,00	1,79	5,65	3,72	1,24	5,23
37	17.07.2015	739	724	752	758	745	741	743	672	2,09	1,83	2,52	0,77	0,29	0,59	9,13
38	27.07.2015	667	653	679	683	672	668	673	614	2,05	1,87	2,33	0,75	0,17	0,87	7,98
39	03.08.2015	708	693	721	725	713	710	713	647	2,07	1,84	2,45	0,76	0,24	0,71	8,66
40	21.08.2015	550	539	561	561	554	549	558	520	1,96	1,96	1,93	0,71	0,10	1,48	5,47
41	07.09.2015	605	593	617	618	609	605	612	564	2,01	1,91	2,14	0,73	0,04	1,17	6,77
42	17.09.2015	684	677	704	700	689	685	689	627	1,02	2,94	2,38	0,75	0,20	0,80	8,28
43	29.09.2015	691	677	704	706	699	692	699	646	2,03	1,89	2,17	1,16	0,14	1,16	6,51