



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра водно-технических изысканий

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

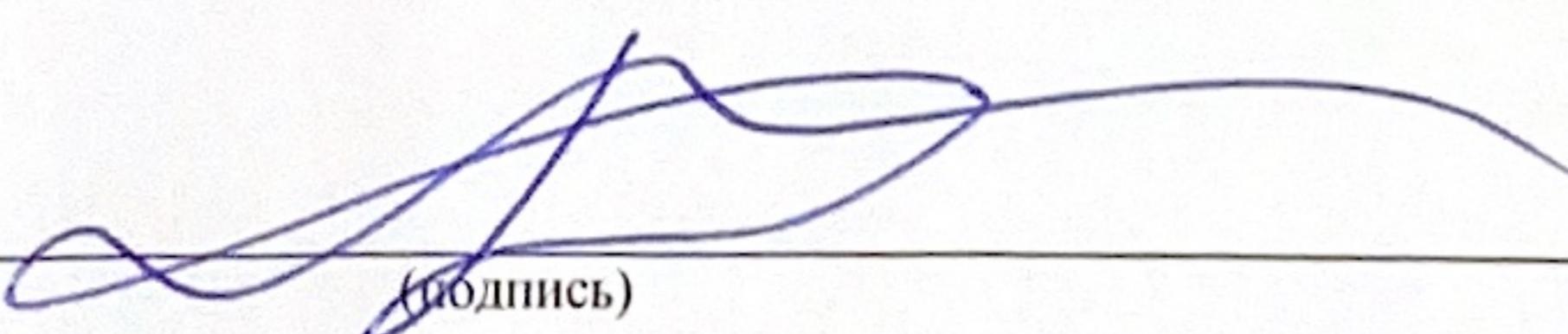
На тему Методы учета стока в
зимний и переходный периоды

Исполнитель Талыбова Лейла Ибрагим кызы
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель Канд.техн.наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Векшина Татьяна Викторовна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

Канд.техн.наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Исаев Дмитрий Игоревич
(фамилия, имя, отчество)

«02 июня 2025г.

Санкт-Петербург
2025

Оглавление

Стр.

Введение.....	2
Глава 1. Физико-географическое описание.....	4
1.1 Физико-географическое описание района.	4
1.2 Физико-географическое описание расчетной реки.....	9
Глава 2. Режим рек в зимний период.....	12
2.1 Изучение зимнего режима рек.....	12
2.2 Виды ледовых явлений.....	13
2.3 Типы зимнего режима и замерзания рек.	18
2.4 Оценки гидравлических сопротивлений.	22
2.5 Вскрытие рек и весенний ледоход.	26
2.6 Ледовый режим рек Центрального Черноземья.	28
Глава 3. Методы учета стока в зимний и переходный периоды.....	31
3.1 Особенности определения стока в зимний период.....	31
3.2 Методы учета стока, используемые на гидрологической сети.	33
3.3 Интерполяционно-гидравлические модели.....	38
3.4 Метод, основанный на использовании параметра Великанова.	42
Глава 4. Анализ результатов расчетов.....	44
Список литературы.	49

Введение.

Повышение точности учета стока — это один из ключевых факторов эффективного использования водных ресурсов. Особенно важны достоверные данные о расходе воды в периоды, когда происходит резкое изменение водности реки.

Методы учета стока разработаны еще в 1958 году в Наставлении и считаются устаревшими. Методы, которые прописаны в Наставлении, чаще всего побуждают к построению графиков и предлагают реализацию на интуитивных приемах. Эти методы не согласуются с современными требованиями и возможностями. Это распространяется и на методы учета стока в зимний и переходный периоды. Один из таких методов использует хронологический график переходных коэффициентов $K_{\text{зим}}$ и графическую интерполяцию измеренных расходов воды. Интерполяция измеренных расходов имеет ограничения, поскольку обеспечивает надежные результаты только при большом объеме измерений, что часто невозможно в осенне-зимний период.

Более точные и обоснованные методы включают интерполяционно-гидравлические модели, разработанные И. Ф. Каравесовым на основе проведенных исследований. В результате этих исследований в 1980 году были предложены и опубликованы рекомендации по учету стока на реках в зимний и переходный периоды, разработанные отделом гидрометрии Государственного гидрологического института (ГГИ) и сотрудниками Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической службы (ВВУГКС) под руководством И. Ф. Каравесова.

Для рек с устойчивым ледоставом была предложена регрессионно-гидравлическая модель (РГМ), которая использует не только гидравлические характеристики, но и фактор времени в качестве предикторов. Это позволяет учитывать закономерность изменения гидравлических сопротивлений в зимний и переходные периоды.

Предлагаемые физико-математические модели были проверены, в частности, ВВУГКС и оказались более эффективными, чем применяемые ранее методы. Однако их распространение было ограничено отсутствием вычислительной техники на гидрологической сети в то время.

К настоящему моменту большинство станций гидрологической сети оснащены компьютерами и могут использовать методы учета стока, требующие большого объема вычислений. Это открывает больше возможностей для повышения точности учета стока за счет внедрения современных методик и технологий, основанных на исследованиях, проведенных в конце прошлого века.

Цель данного исследования — дальнейшее обоснование перехода к физически обоснованным и современным методам учета стока в осенне-зимний период.

В качестве объекта исследования была выбрана река Центрального Черноземья. На реке Оскол в осенне-зимний период лед держится не долго, только вдоль берегов можно наблюдать всю зиму полосы льда шириной менее 5 метров.

Основные задачи для достижения цели исследования:

1. Выявить особенности учета стока в зимний и переходный периоды.
2. Оценить эффективность применения рассматриваемых методов на основе сравнительного анализа результатов расчета.
3. Оценить методы с точки зрения их универсальности и пригодности для использования при разработке компьютерной технологии учета стока.

В качестве исходных данных взяты материалы наблюдений из Гидрологических ежегодников 1964 и 1965 годов.

Глава 1. Физико-географическое описание.

1.1 Физико-географическое описание района.

Географическое положение

Центральный Черноземный экономический район входит в число 12 экономических районов Российской Федерации. Он объединяет пять областей:

Воронежская ($52\ 200\ km^2$), центральный город Воронеж;

Тамбовская ($34\ 500\ km^2$), центральный город Тамбов;

Курская ($30\ 000\ km^2$), центральный город Курск;

Белгородская ($27\ 100\ km^2$), центральный город Белгород;

Липецкая ($24\ 100\ km^2$), центральный город Липецк.

Центрально-черноземный экономический район расположен в центре европейской части РФ. Территория находится на водоразделе по верхнему течению рек Оки, Дона и Сейма.

Район расположен в центральной части европейской России, занимая водораздел верхних течений рек Оки, Дона и Сейма. Его общая площадь составляет 168 тыс. km^2 , что соответствует примерно 1% территории страны. Ключевым экономическим и промышленным центром выступает Воронеж — город с населением свыше 1 миллиона человек. Название «Черноземный» связано с преобладанием здесь плодородных черноземных почв.

На севере граничит с Центральным экономическим районом, на юго-востоке с Поволжским экономическим районом, на юге - с Северо-Кавказским экономическим районом, на западе – с Украиной. [1]

Тектоническое строение и рельеф.

Строение земной коры Восточно-Европейской платформы, также известной как Русская платформа, можно разделить на две основные части:

1. **Фундамент.** Этот слой, сформировавшийся в архейскую и раннепротерозойскую эпохи (более 1,6 млрд лет назад), состоит из сильно деформированных и метаморфизованных осадочных и вулканических пород, которые были прорваны гранитами. Фундамент выходит на поверхность в северо-западной и юго-западной частях платформы, где расположены Балтийский щит и Украинский щит.

2. **Осадочный чехол.** Остальная территория, называемая Русской плитой, покрыта слоем осадочных пород, которые не подвергались метаморфизму. Эти породы были сформированы в рифейский и фанерозойский периоды и залегают горизонтально или с небольшим наклоном.

В пределах Русской плиты встречаются области, где фундамент находится на значительной глубине, а мощность осадочных пород составляет от 3 до 5 километров и более. Эти области называют синеклизы или осадочными бассейнами. Они разделены возвышенностями фундамента, которые называются антеклизы. В этих областях мощность осадочных пород варьируется от нескольких сотен метров до 2 километров.

В юго-восточной части Восточно-Европейской платформы расположена Прикаспийская синеклиза. Она характеризуется тем, что на протяжении всего фанерозоя происходит ее постепенное погружение. В центральной части синеклизы мощность осадочного чехла достигает 20–22 километров.[2]

Рельеф Русской платформы преимущественно холмисто-равнинный. На нем чередуются возвышенности высотой до 200–300 метров и низменные участки.

В пределах Восточно-Европейской платформы можно выделить три основных региона:

1. **Центральная часть.** Здесь чередуются крупные возвышенности, такие как Среднерусская, Приволжская и Бугульминско-Белебеевская, а также низменности, включая Общий Сырт.

2. Северная часть. Здесь преобладают низкие равнины с небольшими возвышенностями. В северо-восточном направлении простираются Смоленско-Московская возвышенность, Валдайская гряда и Северные Увалы.

3. Южная часть. Здесь преобладают низменности. Наиболее значимая из них — Прикаспийская низменность.

Средняя высота Русской равнины составляет около 170 метров над уровнем моря, а максимальная высота достигает 479 метров и находится на Бугульминско-Белебеевской возвышенности в приуральском регионе.[3]

Природные зоны и их климат.

На Восточно-Европейской равнине наблюдается четкая широтная зональность природных ландшафтов, которая проявляется в последовательной смене климатических и биогеоценотических комплексов с севера на юг. В пределах равнины выделяются следующие природные зоны: тундра, лесотундра, тайга, смешанные леса, широколиственные леса, лесостепь, степь, полупустыня и пустыня.

Тундра занимает северную часть равнины, простираясь вдоль побережья Баренцева моря до Полярного Урала. Климат субарктический, с морскими чертами, характеризуется низкими температурами и значительным количеством осадков. Средняя температура января колеблется от -10 °C на Канинском полуострове до -20 °C на Югорском. Летние температуры достигают около +5 °C, а годовое количество осадков составляет 600-500 мм. Почвы характеризуются наличием многолетней мерзлоты и высокой заболоченностью.

Лесотундра представляет собой узкую полосу шириной 30-40 км, расположенную южнее тундры. Здесь преобладают низкорослые леса высотой до 5-8 метров, адаптированные к суровым климатическим условиям.

Тайга занимает южную часть равнины и простирается до широт Санкт-Петербурга, Ярославля, Нижнего Новгорода и Казани. Климат умеренно континентальный, с более мягкими зимами и прохладным летом. Годовое количество осадков составляет от 600 мм на равнинах до 800 мм на возвышенностях.

Между тайгой и лесостепью располагаются смешанные и широколиственные леса. Климат в этой зоне умеренно континентальный, но более теплый и мягкий по сравнению с тайгой. Зимы короче, а лето продолжительнее.

Лесостепная зона протягивается от южной границы лесной зоны до линии Воронеж — Саратов — Самара. Здесь наблюдается переход от лесных экосистем к степным. Климат умеренно континентальный с увеличением континентальности к востоку. Зимние температуры колеблются от -5 °C на западе до -15 °C на востоке, а летние температуры составляют +20...+22 °C. Годовое количество осадков уменьшается в восточном направлении, что приводит к засушливости в некоторых районах. Коэффициент увлажнения близок к 1, однако в последние годы участились случаи летней засухи.

Степная зона простирается от южной границы лесостепи до Кумо-Манычской впадины и Прикаспийской низменности. Климат умеренно континентальный, с выраженной континентальностью. Лето жаркое, со средней температурой +22...+23 °C. Зимние температуры варьируются от -4 °C на западе до -15 °C на востоке. Годовое количество осадков уменьшается с запада на восток, составляя 500-400 мм. Коэффициент увлажнения меньше 1, что способствует частым засухам и суховеям. Северные степи более влажные, но менее теплые по сравнению с южными.

Полупустынная и пустынная зоны располагаются в юго-западной части Прикаспийской низменности. Климат характеризуется высокой степенью континентальности и засушливостью. Лето жаркое, с температурой +22 +23 °C,

а зимы умеренно холодные. Годовое количество осадков составляет 500-400 мм, что приводит к недостатку влаги. Коэффициент увлажнения значительно меньше 1, что увеличивает риск засух и суховеев. [4]

Поверхностные воды.

Гидрологические характеристики Восточно-Европейской равнины определяются климатическими условиями, топографией, геологическим строением и историей формирования региона.

В северо-западной части равнины под воздействием древнего оледенения сформировался холмисто-грядовый рельеф с молодыми речными долинами. В южной части, не затронутой оледенением, развился эрозионный рельеф с асимметричными склонами долин, балок и водоразделов.

Течение рек на равнине обусловлено ее орографией, геоструктурными особенностями и глубинными разломами земной коры. Речные долины формируются в тектонических впадинах, образованных разломами и интенсивными движениями земной коры. Например, в зоне контакта Балтийского щита и Русской плиты находятся бассейны рек Онеги и Сухоны, а также крупные озера: Чудское, Ильмень, Белое и Кубенское.

Поверхностный сток Восточно-Европейской равнины направлен в бассейны Северного Ледовитого, Атлантического океанов и бессточную область Каспийского моря. Главный водораздел между этими бассейнами проходит через Ергени, Приволжскую и Среднерусскую возвышенности, Валдаи и Северные Увалы.

Максимальный среднегодовой сток (10–12 л/с с 1 км²) характерен для рек, впадающих в Баренцево море, таких как Печора, Северная Двина и Мезень. На Волге модуль стока варьируется от 8 л/с с 1 км² в верховьях до 0,2 л/с с 1 км² в дельте.

По обеспеченности поверхностными водными ресурсами Восточно-Европейскую равнину можно разделить на три зоны: северные районы с высоким уровнем обеспеченности, центральные районы со средней обеспеченностью, где дефицит воды наблюдается в промышленных и урбанизированных центрах, и южные и юго-восточные районы с низкой обеспеченностью (южное Поволжье, Заволжье и Задонье).[5]

1.2 Физико-географическое описание расчетной реки.

Река Оскол имеет протяженность 472 километра и водосборный бассейн площадью 14 800 квадратных километров. Исток реки расположен в Тимском районе Курской области, координаты его: $51^{\circ}36'$ северной широты и $37^{\circ}13'$ восточной долготы. Среднее русло реки имеет ширину от 10 до 40 метров, а в некоторых местах расширяется до 300 метров. Дно реки характеризуется неровностями, глубина варьируется от 0,4 метра в перекатах до 10 метров в глубоких участках. Средняя скорость течения составляет около 0,2 м/с, однако на перекатах может достигать 1,2 м/с.

Расход воды на расстоянии 10 километров от устья составляет $43,1 \text{ м}^2/\text{с}$. Река Оскол впадает в Северский Донец, находящийся в 580 километрах от устья. Уклон реки составляет 0,29 м/км.

Основное питание реки осуществляется за счет снега. Половодье обычно наблюдается с конца марта до начала мая. Замерзание реки происходит в ноябре — начале декабря, а вскрытие — в марте — начале апреля. Средняя толщина ледяного покрова составляет 0,45 метра.

Пойма реки имеет широкую зону, включающую заболоченные участки и озера-старицы. Русло реки отличается извилистостью, течение спокойное и медленное. Правый берег характеризуется значительной высотой и крутизной, в то время как левый берег низкий и пологий.

В реку Оскол впадают многочисленные притоки, среди которых Уразовка, Мокрая Козинка, Валуй, Халанка, Ольшанка, Орлик, Гнилая, Горосим, Дорожная, Стужень, Репецкая Плота и Быстрец. [6]

Исток реки Оскол расположен на одном из холмов Среднерусской возвышенности на высоте, незначительно превышающей уровень моря. Территория, где находится исток, административно принадлежит Курской и Белгородской областям.

Исток реки представляет собой небольшой водоем полулунной формы с максимальной шириной до 22 метров, расположенный вблизи деревни Погоже в Тимском районе Курской области. Вокруг водоема простираются сельскохозяйственные угодья, пойменные заросли и кустарниковая растительность. Непосредственно у подножия холма находятся огороды и постройки населенного пункта.

В нижнем течении река образует две протоки, которые впадают в Северский Донец. Западная протока достигает ширины 44 метра, восточная — 63 метра. Расстояние между протоками по фарватеру Северского Донца составляет около 2 километров. Вместе с основным руслом они формируют займищный остров диаметром до 2140 метров.

Правый берег западной протоки покрыт густым широколиственным лесом. Левый берег восточной протоки характеризуется наличием заболоченных участков и редколесья. Оба берега возвышаются над водной поверхностью примерно на 0,5 метра. Устьевая зона реки находится на территории Оскольской общины Изюмского района Харьковской области Украины. На противоположном берегу Северского Донца расположено село Синичено.

В верхней части течения река Оскол течет на юго-восток вдоль Среднерусской возвышенности. В этом участке долина реки имеет узкую форму, с высоким северным берегом. Ширина русла не превышает 2–3 метров. Пойменная зона густо заросла и окружена сельскохозяйственными угодьями и

лесостепными ландшафтами. В районе Старого Оскола долина расширяется до 2 километров (зона Старооскольского водохранилища).

Далее река проходит через меловые гряды. Высота обрывов в этих местах достигает 30 метров. Ниже Валуек долина реки расширяется до 3 километров, а русло становится более извилистым, сохраняя южное направление. Ширина реки увеличивается до 25 метров и более.

Во второй половине среднего течения река протекает через заболоченные участки поймы, где присутствуют многочисленные рукава и старицы, особенно выраженные вблизи украинской границы (за Уразово). Правый берег становится более крутым из-за врезание реки в отроги Донецкого кряжа, в то время как левый берег остается пологим. Глубина реки варьируется от 0,4 метра на перекатах до 10 метров на плесах. В Червонооскольском водохранилище глубина достигает до 19 метров.

В нижней части течения река отклоняется к западу от Донецкого кряжа, ее ширина превышает 40 метров. Берега реки местами обрывистые, с наличием старицких озер и заболоченных участков. Течение реки спокойное, что обусловлено ее зарегулированием гидроузлами и малым уклоном.

Река Оскол, наряду с другими водными артериями региона, участвует в питании канала Северский Донец — Донбасс. [7]

Глава 2. Режим рек в зимний период.

2.1 Изучение зимнего режима рек.

Формирование ледяного покрова на реках в зимний период влияет на гидравлические характеристики водного потока. При проектировании и эксплуатации мостовых сооружений необходимо учитывать особенности зимнего гидрологического режима рек, включая процессы ледообразования и ледохода. Эти факторы могут существенно повлиять на объем и содержание проектных и строительных работ уже на стадии инженерно-геологических изысканий.

В частности, измерение глубин и бурение разведочных скважин для изучения геологических характеристик оснований мостовых опор могут быть выполнены с поверхности ледяного покрова, что упрощает процесс и снижает затраты на специализированное оборудование.

В отдельных случаях строительные работы могут быть организованы на льду. В инженерной практике зафиксированы примеры, когда подводная часть промежуточных опор мостовых сооружений возводилась в зимний период методом искусственного промораживания речного русла до дна.

Проектная документация должна содержать анализ эксплуатационных условий, включая расчетные нагрузки от ледяного покрова на опорные конструкции, прогнозирование сроков прохождения ледяных масс через пролеты мостов, а также оценку размеров и конфигурации ледяных полей. Особое внимание следует уделить анализу факторов, влияющих на формирование заторов и зажоров на реках.

Зимний гидрологический режим рек определяется географическим положением и климатическими характеристиками речных бассейнов. В южных регионах России реки либо не замерзают в зимний период, либо покрываются

ледяным покровом на непродолжительное время. В средней полосе России реки замерзают на несколько месяцев, например, река Волга покрывается льдом на шесть месяцев. В бассейнах рек, впадающих в Северный Ледовитый океан, ледовый покров сохраняется в течение более длительного периода, достигая восьми месяцев и более.

2.2 Виды ледовых явлений.

Процесс формирования ледяного покрова на водоемах начинается с мелководных зон, таких как прибрежные участки и заливы. В этих зонах, где скорость течения низкая, охлаждение воды происходит наиболее интенсивно.

На поверхности водоема образуются забереги — ледяные полосы, формирующиеся вдоль береговой линии. Забереги постепенно расширяются до тех пор, пока не соединятся между собой.

Полыни представляют собой участки реки, на которых отсутствует ледяной покров. Они возникают в зонах с быстрым течением, например, на перекатах, или в местах, где в воду поступают теплые водные массы, например, от термальных источников. Полыни могут сохраняться на протяжении всей зимы.

На участках реки с быстрым течением и интенсивным перемешиванием водных масс может формироваться внутриводный лед. Этот лед представляет собой отдельные кристаллы, которые образуются непосредственно в потоке воды.

В дальнейшем эти кристаллы могут объединяться, образуя шугу — рыхлые комки льда губчатой структуры. Шуга обычно находится на поверхности воды и может задерживаться в определенных местах, таких как

изгибы реки или участки с замедленным течением. В этих зонах шуга может срастаться с ледяным покровом, постепенно уплотняясь.

Зажор представляет собой скопление шуги, содержащее мелкие ледяные фрагменты. Зажор может полностью или частично перекрывать русло реки, что приводит к сопротивлению движению водных масс. Это, в свою очередь, вызывает подъем уровня воды выше по течению и его снижение ниже по течению.

При достижении зажором участка, где проходит мост, могут возникнуть значительные нагрузки на конструкцию моста из-за разницы в уровнях воды. Кроме того, зажор может способствовать деформации русла реки и подмыву опор моста.

Ледостав — это стадия, при которой на поверхности водоема формируется сплошной ледяной покров. По мере увеличения количества и размеров льдин скорость их перемещения снижается. В местах сужения русла, на мелководных участках, вблизи островов и искусственных сооружений ледяные массы могут задерживаться. При низких температурах это приводит к ускоренному смерзанию льдин и формированию сплошного ледяного покрова.

Описанный процесс замерзания рек является типичным, однако на небольших реках и отдельных участках крупных рек с медленным течением ледостав может устанавливаться быстро, без предварительного осеннего ледохода.

Неодновременное замерзание различных участков реки может вызывать определенные проблемы. Льдины могут ломаться и нагромождаться, формируя торосы.

В зимний период, до начала таяния снежного покрова, наблюдается увеличение толщины ледяного слоя на большинстве рек. На северных реках

этот показатель достигает 2,5–2,8 метра, в то время как на остальных водоемах он варьируется от 0,5 до 1,5 метра.

Для определения максимальной толщины ледяного слоя проводятся специализированные измерения. В случае отсутствия данных измерений можно использовать следующую формулу:

$$h_{\text{л}} = 2 \sqrt{T_{\text{max}}} \quad (2.1)$$

где $h_{\text{л}}$ – толщина льда, см; T_{max} - максимальное значение среднесуточных отрицательных температур в период от ледостава до вскрытия (в градусах Цельсия).

Для оценки прочностных характеристик льда, необходимых для обеспечения устойчивости экскаваторов, размещенных на его поверхности, применяется формула М. М. Порфириева:

$$h_{\text{л}} = (13 \div 15) \sqrt{P} \quad (2.2)$$

где P – собственный вес размещаемых на льду экскаваторов при отсутствии майны.

К моменту вскрытия реки толщина ледяного слоя уменьшается на 20–30%. Однако при проведении расчетов прочности мостовых опор на воздействие давления льда в период весеннего ледохода принимается максимальная толщина ледяного покрова, зафиксированная за зимний период.

Прочность ледяного слоя подвержена значительным колебаниям в зависимости от температурных условий. При экстремально низких температурах прочность льда увеличивается, в то время как в периоды оттепели наблюдается резкое снижение этого показателя.

Колебания уровня воды в реке, температурные деформации ледяного покрова и воздействие ветровых нагрузок приводят к образованию трещин в толще льда. В случае повышения уровня воды выше верхней кромки ледяного слоя часть льда может быть затоплена, что приводит к выходу воды через

образовавшиеся трещины. Замерзание воды на поверхности ледяного покрова способствует формированию наледей, которые могут достигать значительной толщины.

В регионах с суровыми климатическими условиями малые реки могут промерзать до дна, что приводит к образованию бугров на поверхности льда. Эти бугры могут возникать под воздействием давления воды, которое может достигать критических значений. В результате резкого увеличения давления лед "взрывается", разбрасывая фрагменты ледяного покрова в разные стороны, а вода разливается по поверхности.

Наледь представляет собой многослойное образование льда, формирующееся в результате многократного замерзания и оттаивания воды. Наледь может достигать значительной толщины и превосходить стандартные показатели ледяного покрова.

Такие образования могут полностью перекрывать отверстия в трубах и мостах, что приводит к их закупорке. Мощная ледяная масса наледей сохраняется дольше снежного покрова в речном бассейне. Талые воды при искусственно повышенном уровне проходят через наледь.

Процесс вскрытия рек начинается с приходом весеннего потепления. Увеличение расхода воды и соответствующее повышение уровня воды приводят к поднятию ледяного покрова. Горизонт, на котором начинается первая подвижка льда, можно прогнозировать, учитывая следующие факторы:

Осенью река замерзает на определенном уровне. В зимний период, из-за уменьшения водного питания, уровень воды снижается, что приводит к опусканию ледяного покрова. Весной, при повышении уровня воды, лед поднимается до уровня ледостава, однако его движение сдерживается береговыми линиями. Только после дополнительного повышения уровня воды на толщину ледяного слоя у берегов образуются свободные пространства воды — закраины, что позволяет льду начать движение. Первая подвижка льда

обычно малозаметна и кратковременна, с продвижением льда на несколько десятков сантиметров. За ней следуют вторая и третья подвижки, после которых начинается сплошной ледоход.

Ледоход представляет собой сложный гидрологический процесс, характеризующийся перемещением ледяных масс по речному руслу, обусловленный совокупностью факторов, включая нарастание толщины ледяного покрова и его последующее разрушение под воздействием температурных градиентов и механических напряжений. Этот процесс является неотъемлемой частью сезонного водного режима рек и оказывает значительное влияние на их гидрологический режим.

В участках речного русла, подверженных сужению, образованию излучин, наличию отмелей и других гидроморфологических особенностей, формируются локальные скопления льдин, известные как заторы и зажоры. Эти скопления льда создают гидравлические препятствия, способствующие повышению уровня воды в реке. Таким образом, ледовые процессы вносят существенные корректиры в гидрологический режим рек, нарушая прямую корреляцию между уровнем воды и гидрологическим расходом, характерную для периода открытого русла.

Явления, такие как затор, зажор, шугоход и собственно ледоход, представляют собой взаимосвязанные компоненты единого ледового процесса, оказывающие комплексное воздействие на водный режим рек. Эти процессы существенно искажают традиционные зависимости, основанные на линейной корреляции между гидрологическим расходом и уровнем воды, что требует более детального и комплексного подхода к их изучению и прогнозированию.

[9]

2.3 Типы зимнего режима и замерзания рек.

При определении типа зимнего гидрологического режима реки учитывается комплекс параметров, включая продолжительность ледостава, наличие и динамику наледей, стабильность ледовых фаз, а также специфику формирования ледяного покрова и его влияние на водный поток. Эти факторы играют ключевую роль в формировании гидрологических характеристик реки в зимний период.

Наиболее детальную классификацию зимнего режима рек предложил Б. П. Панов, однако данная классификация не получила широкого распространения в научной среде из-за своей высокой степени детализации, что затрудняет ее практическое применение.

С точки зрения учета водного стока, зимний режим рек можно классифицировать на четыре основных типа:

1. Длительный устойчивый ледостав, характеризующийся стабильными ледовыми фазами и возможными оттепелями.
2. Неустойчивый ледостав, при котором наблюдаются частые изменения ледовых фаз.
3. Подпор от зажоров, возникающий вследствие формирования ледяных заторов, препятствующих естественному течению реки.
4. Перемерзание и образование наледей, сопровождающееся формированием ледяных образований, выходящих за пределы русла реки.

Анализ представленных данных позволяет сделать вывод, что процесс замерзания рек может происходить двумя основными способами:

1. Постепенное расширение заберегов с последующим их смыканием, что приводит к формированию сплошного ледяного покрова.
2. Одновременное образование ледяных перемычек в нескольких зонах с последующим заполнением пространства между ними дрейфующим

льдом. Этот механизм способствует более равномерному формированию ледяного покрова.

На реках с быстрым течением наблюдается ряд дополнительных механизмов замерзания, обусловленных гидродинамическими особенностями:

1. Перемещение кромки льда вверх по течению под воздействием скорости водного потока.
2. Формирование ледяных перемычек, через которые проходят шуга и всплыvший донный лед, что способствует их перемещению и дальнейшему замерзанию.

Таким образом, зимний гидрологический режим рек представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных процессов, зависящих от множества факторов, включая климатические условия, морфологические особенности русла и гидродинамические характеристики водного потока.

Табл 2.1 Типизация зимнего режима рек.

Типы зимнего режима	Характеристика
1.Длительный устойчивый ледостав а)без оттепелей б)с оттепелями	Сплошной ледостав при отсутствии шуги или наличия в небольших количествах при замерзании. а) изменение расхода носит характер постепенного уменьшения. б) колебания расхода разного знака
2.Неустойчивый ледостав	Отсутствие непрерывного сплошного ледостава, подвижки льда, временные вскрытия, полыньи, ограниченная шугоносность.
3.Подпор от зажора	Длительные периоды подпора от зажора на нижележащем участке.
4.Перемерзание и наледи	Промерзание водотока и образование наледного течения воды.

Анализ речного стока требует детального рассмотрения характеристик зимнего режима водных объектов, включая процессы льдообразования, ледотаяния, стабильность ледяного покрова, а также закономерности динамики уровня воды в зимний период. Эти аспекты играют ключевую роль в формировании гидрологического режима рек и оказывают значительное влияние на их функционирование в зимний период.

Процесс ледотаяния может быть инициирован различными механизмами, такими как тепловое излучение, гидродинамическое воздействие потока на ледяной покров и их совместное действие. Эти факторы взаимодействуют

сложным образом, определяя динамику таяния льда и его влияние на водный режим реки.

Зимний период на реках можно структурировать на основе особенностей ледовых процессов и гидрологических характеристик на следующие этапы:

1. Предледоставный период: характеризуется начальными стадиями формирования ледяного покрова и подготовкой реки к зимнему режиму.

2. Период зажоров и заторов: включает процессы формирования ледяных заторов и зажоров, которые могут существенно влиять на уровень воды и гидродинамические условия.

3. Период устойчивого ледяного покрова: характеризуется стабильностью ледяного покрова и его влиянием на гидрологический режим реки.

4. Период предвесеннего повышения уровня и расхода воды: отмечается увеличением водного стока и изменением уровня воды перед началом весеннего ледохода.

5. Период подвижек льда (предледоходный): включает начальные стадии разрушения ледяного покрова и подготовку к вскрытию реки.

6. Период весеннего ледохода (вскрытие): характеризуется полным разрушением ледяного покрова и освобождением реки от льда.

Важно отметить, что все перечисленные этапы, за исключением третьего, представляют собой переходные периоды, характеризующиеся динамическими изменениями в гидрологическом режиме реки. Эти переходные периоды играют ключевую роль в формировании зимнего и весеннего гидрологического режима.

Процессы, происходящие в зимний период, характеризуются высокой степенью взаимосвязи и взаимозависимости. Изолированное рассмотрение отдельных этапов может привести к неполному пониманию динамики водного режима. Например, характер ледотаяния может существенно зависеть от

условий замерзания реки, что подчеркивает необходимость комплексного подхода к анализу зимнего режима рек.

Таким образом, детальное изучение характеристик зимнего режима рек, включая процессы льдообразования, ледотаяния и динамику уровня воды, является важным аспектом для понимания и прогнозирования гидрологических процессов в зимний период.

2.4 Оценки гидравлических сопротивлений.

Гидравлические сопротивления представляют собой сложные физические явления, которые препятствуют движению водных потоков в речных руслах. Эти силы, возникающие в результате взаимодействия потока с различными элементами русла, играют ключевую роль в формировании гидродинамических характеристик водных систем. Величина гидравлических сопротивлений зависит от множества факторов, включая наличие выступов на дне и берегах, изгибы русла, водную растительность и ледяные образования.

Для проведения количественной оценки гидравлических сопротивлений используются интегральные характеристики, которые позволяют учесть комплексное влияние различных факторов на течение. Среди наиболее значимых параметров, применяемых в гидродинамических расчетах, можно выделить коэффициент шероховатости (n), коэффициент Шези (C), коэффициент гидравлического трения (λ) и высоту выступов шероховатости (Δ).

Высота выступов шероховатости, хотя и учитывает лишь один аспект гидравлических сопротивлений, может рассматриваться как интегральная характеристика при условии, что она используется в рамках комплексного подхода, учитывающего все значимые факторы. В некоторых случаях высота выступов шероховатости может быть применена в различных формулах для

расчета гидравлических сопротивлений, что позволяет получить более точные и обоснованные результаты.

Под сплошным ледяным покровом, дрейфующим на поверхности водных масс, могут протекать исключительно напорные потоки. В теоретическом аспекте, с использованием современных методов гидродинамического моделирования, возможно произвести расчеты параметров таких потоков даже при наличии многослойной ледяной структуры внутри них. Однако для валидности результатов необходимо соблюдение ряда ключевых условий. Во-первых, каждый слой льда должен покрывать всю ширину потока и обладать достаточной протяженностью вдоль русла реки, чтобы исключить влияние краевых эффектов. Во-вторых, движение потоков должно быть строго равномерным, без локальных возмущений, что обеспечивает стабильность гидравлических характеристик. Кроме того, гидравлическая шероховатость русла должна оставаться неизменной на протяжении всего участка, где наблюдаются напорные потоки. Эти условия являются критическими для корректного применения теоретических моделей и получения достоверных данных о параметрах потоков под ледяным покровом.

Перед тем как перейти к детальному анализу методов расчета гидродинамических параметров речных потоков, необходимо рассмотреть механизмы формирования ледяного покрова на реках, которые определяют величину и характер изменения шероховатости нижней поверхности ледяного покрова. Эти процессы демонстрируют значительную вариативность в зависимости от водности реки и ее географического направления относительно сторон света.

Особую категорию представляют крупные реки, протекающие с юга на север, такие как Обь, Енисей, Лена, Печора, Северная Двина и другие. На большинстве из них наблюдаются интенсивные процессы осеннего ледохода, часто сопровождающиеся образованием заторов и зажоров.

Формирование ледяного покрова на таких реках происходит посредством замерзания отдельных льдин различных размеров и форм, включая горизонтальные, вертикальные и промежуточные. Этот процесс приводит к резкому изменению шероховатости нижней поверхности ледяного покрова в момент установления ледостава.

На основе данных полевых наблюдений, проведенных на реках Енисей и Ангара, были построены графики зависимости коэффициента шероховатости ледяного покрова ($n_{\text{пл}}$) от времени (T), что позволило установить закономерности изменения этого параметра в динамике ледостава.

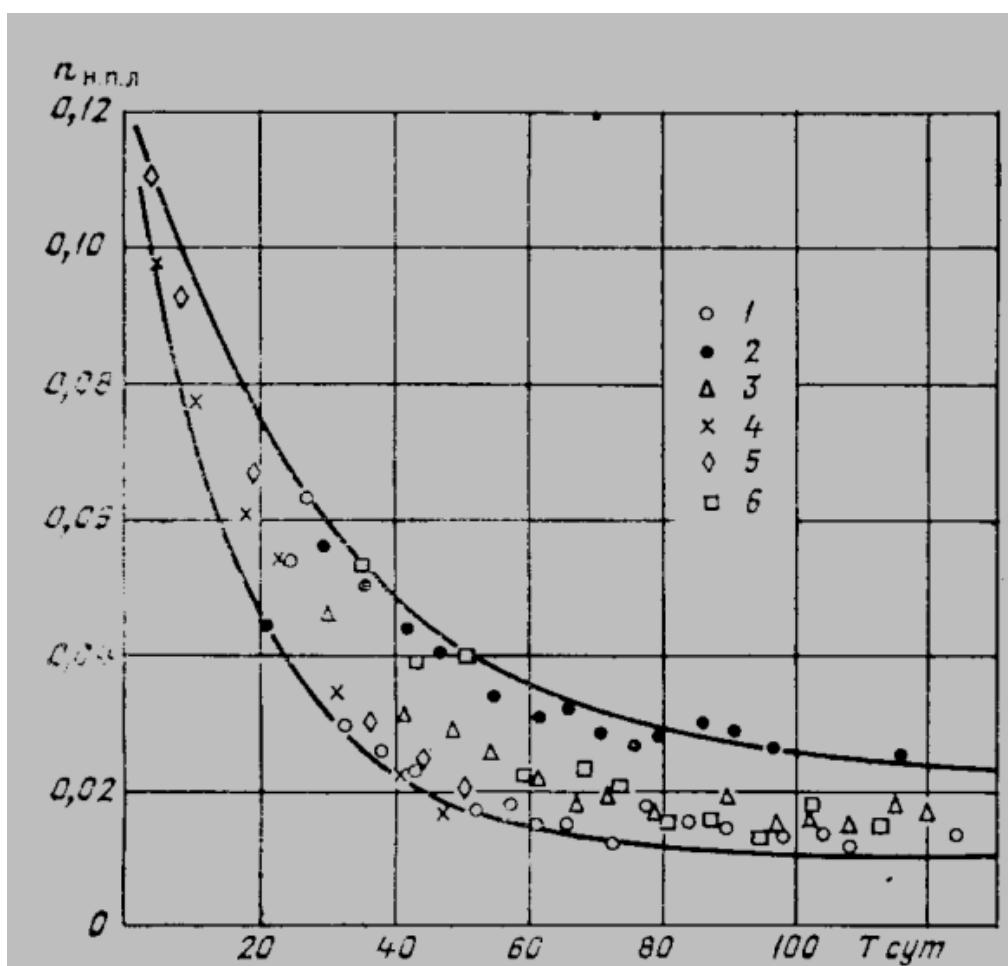


Рис 2.1. Динамика изменения коэффициента шероховатости нижней поверхности льда в зависимости от времени, прошедшего с момента образования ледового покрова на реке Ангара в районе села Невон.

Коэффициент шероховатости поверхности рек претерпевает значительные ежегодные флюктуации, обусловленные комплексным взаимодействием гидродинамических процессов и температурных колебаний. Эрозионная деятельность водного потока, а также аккумуляция льда на нижней поверхности выступающих элементов приводят к их сглаживанию, что вызывает постепенное снижение значений коэффициента шероховатости. Данный феномен наблюдается на протяжении всей зимней стагнации, прерываясь лишь весной, перед началом ледохода, когда происходит незначительное повышение коэффициента, связанное с изменением структуры ледяного покрова.

Представленная динамика характерна для рек, протекающих в северном направлении, с типичным осенним ледоходом и стабильным ледоставом в зимний период. В малых и средних реках, текущих в обратном направлении, процесс замерзания имеет иную специфику. Замерзание начинается с формирования заберегов у берегов с минимальной скоростью течения, которые постепенно расширяются и срастаются, охватывая основную часть русла. В этих условиях значения коэффициента шероховатости значительно ниже и колеблются в диапазоне $n_l = 0,04-0,06$. Несмотря на это, наблюдается тенденция к его снижению во времени, хотя и с меньшей интенсивностью по сравнению с северными реками.

Основной причиной уменьшения коэффициента шероховатости является обтаивание выступов на нижней поверхности льда под воздействием водного потока. В этом случае динамическая ось потока сохраняет более стабильное положение, что существенно снижает пространственно-временные вариации коэффициента шероховатости.

Помимо описанных базовых сценариев замерзания рек, существуют промежуточные варианты, однако их детальный анализ выходит за рамки данного исследования. Все рассмотренные процессы замерзания характерны

для естественных, незарегулированных рек. В зарегулированных водотоках динамика замерзания приобретает ряд специфических особенностей.

Верхние бьефы крупных водохранилищ замерзают на 2–3 недели позже в сравнении с естественными условиями. В нижних бьефах формируется полынья значительных размеров, площадь которой может достигать десятков и даже сотен квадратных метров. Кроме того, вследствие попусков режима работы гидроэлектростанций в ледяном покрове нижнего бьефа образуется продольная трещина, протяженность которой может достигать десятков километров. Эти особенности необходимо учитывать при разработке и верификации расчетных методик.

2.5 Вскрытие рек и весенний ледоход.

С наступлением весеннего периода, в условиях повышения температуры и увеличения интенсивности солнечной радиации, происходит таяние снежно-ледяного покрова. Этот процесс сопровождается значительным увеличением уровня воды в речных системах. В малых реках возможно частичное затопление ледового покрова до его полного оттаивания, что значительно затрудняет проведение взрывных работ по разрушению льда. На средних и крупных реках ледяной покров приобретает выпуклую форму, и при достижении определенного уровня воды происходит его отслаивание от береговой линии, что приводит к образованию ледовых подвижек.

Инициирование ледовых подвижек происходит вследствие образования трещин в ледяном покрове, что вызывает его фрагментацию на отдельные поля. Начальная стадия подвижек характеризуется минимальной интенсивностью и длится несколько минут при относительно низком уровне воды. Последующие стадии подвижек происходят при более высоких уровнях воды. Ледяные поля оказывают значительное давление на инженерные сооружения, достигающее десятков тонн, что представляет серьезную опасность для объектов, расположенных на берегах рек.

На крупных реках, характеризующихся меридиональным или субширотным течением, процесс таяния ледяного покрова до момента вскрытия водной поверхности может быть продолжительным. В частности, на реке Обь этот период может занимать до одного месяца и более. Следует отметить, что пространственная вариабельность толщины льда может быть весьма значительной, варьируясь в диапазоне от 13% до 40% от максимальных значений, зарегистрированных за зимний период.

Продолжительность ледохода на малых реках составляет несколько часов, тогда как на крупных реках этот процесс может длиться до 15 суток, что обусловлено формированием заторов. Густота ледохода уменьшается к концу данного периода. Толщина и прочность ледяного покрова варьируются в зависимости от климатических условий и особенностей вскрытия реки. Заторы возникают в результате скопления льда у естественных или искусственных препятствий, что приводит к повышению уровня воды до 6 метров. Прорыв заторов может происходить как вскоре после их формирования, так и в течение 10 суток. При прорыве затора лед и вода перемещаются с высокой скоростью, достигающей 40 км/ч, что представляет серьезную угрозу для мостов, инженерных сооружений и судов.

Наибольшую опасность заторы представляют для деревянных мостов, плотин и дамб. Кроме того, они могут привести к затоплению населенных пунктов и сельскохозяйственных угодий. Заторы значительно задерживают начало навигационного сезона и могут вызывать изменения в конфигурации речного русла. После завершения ледохода наблюдается продолжение повышения уровня воды, обусловленное процессами, связанными с таянием льда и изменением гидрологических условий. [11]

Анализ данных о процессе разрушения ледяного покрова рек и водохранилищ в весенний период позволяет сформулировать ряд выводов, имеющих важное значение для понимания гидрологических процессов в этот период.

1. На водотоках, где вскрытие льда происходит преимущественно под воздействием механической силы, доля таяния льда минимальна. Это обусловлено тем, что механическая энергия, действующая на ледяной покров, не способна эффективно его разрушить без сопутствующего термического воздействия.

2. На реках, где процесс разрушения ледяного покрова определяется как механической, так и тепловой энергией, доля таяния ледяного покрова составляет приблизительно 10-20% от его максимальной толщины, сформировавшейся за зимний период. Даный факт указывает на то, что термическое воздействие играет ключевую роль в процессе разрушения ледяного покрова, дополняя механическое воздействие.

3. На водотоках, где вскрытие ледяного покрова преимущественно обусловлено тепловой энергией, объем весеннего таяния льда может достигать 50% от максимальной толщины, зафиксированной за зимний период. Это свидетельствует о том, что в условиях интенсивного термического воздействия процесс разрушения льда может протекать значительно быстрее, чем при доминировании механической силы.

4. В верхней части водохранилищ, где формируется мощный ледяной покров, процесс его разрушения происходит медленно, преимущественно под воздействием механических сил. Это связано с тем, что толщина ледяного покрова в этой зоне максимальна, и термическое воздействие оказывается менее эффективным. В нижней части водохранилищ, где толщина ледяного покрова за зимний период существенно меньше, его таяние весной протекает более интенсивно, что обусловлено как увеличением термического воздействия, так и уменьшением механической прочности льда.

2.6 Ледовый режим рек Центрального Черноземья.

Ледовый режим рек Центрально-Черноземного экономического района характеризуется умеренной продолжительностью и значительной

изменчивостью под влиянием климатических и антропогенных факторов. Для этого региона, включающего Белгородскую, Воронежскую, Курскую, Липецкую и Тамбовскую области, типичны следующие особенности формирования и развития ледовых явлений.

Первые ледовые образования появляются обычно во второй половине ноября, когда температура воды опускается до 0,1-0,3°C. Начальная фаза ледообразования проявляется в виде сала и шуги - внутриводного льда, который постепенно всплывает на поверхность. Одновременно вдоль берегов формируются узкие полосы неподвижного льда - забереги. Особенно активно этот процесс происходит на малых реках с незначительным течением, таких как Усмань, Икорец или Потудань.

Сплошной ледостав, представляющий собой непрерывный ледяной покров, устанавливается в декабре. На крупных водных артериях - Доне и Воронеже - этот процесс может затягиваться до середины января из-за относительно сильного течения. Средняя продолжительность ледостава колеблется от 60 дней на юге региона до 110 дней в северных районах. Толщина льда в течение зимы достигает 20-50 см, при этом максимальные значения (до 60 см) наблюдаются в феврале в бассейне реки Сейм.

Зимний период характеризуется сложным комплексом ледовых явлений. На реках с быстрым течением (например, Сосна, Красивая Мечка) регулярно образуются наледи - слоистые ледяные тела, формирующиеся при замерзании периодически изливающихся на поверхность грунтовых вод. В местах сброса относительно теплых промышленных или коммунальных стоков (ниже Липецка, Воронежа, Старого Оскола) сохраняются полыни, размеры которых зависят от температуры и объема сбрасываемой воды.

Весеннее вскрытие рек происходит в марте, при этом процесс часто сопровождается заторами льда, особенно в местах резких поворотов русла или сужений долины. Наиболее проблемными в этом отношении являются участки

Воронежа у Липецка и Сейма в черте Курска, где неоднократно фиксировались подтопления прибрежных территорий. Средние даты очищения рек ото льда приходятся на первую декаду апреля, хотя в последние годы отмечается тенденция к более раннему вскрытию - на 5-7 дней раньше многолетних значений.

Современные изменения климата оказывают заметное влияние на ледовый режим. Анализ данных за последние 30 лет показывает устойчивую тенденцию к сокращению продолжительности ледостава в среднем на 8-12 дней, уменьшению максимальной толщины льда на 5-15 см и учащению зимних оттепелей, приводящих к временному разрушению ледяного покрова. Особенно ярко эти процессы проявляются в южной части региона - в бассейнах рек Тихая Сосна и Черная Калитва.

Антропогенное воздействие существенно модифицирует естественный ход ледовых процессов. Создание крупных водохранилищ (Воронежское, Матырское) привело к сокращению периода ледостава ниже плотин на 15-20 дней. Регулярные сбросы теплых вод промышленными предприятиями формируют локальные зоны с аномальным ледовым режимом. Например, ниже Новолипецкого металлургического комбината на реке Воронеж протяженность постоянной полыни достигает 3-5 км даже в самые холодные зимы.

Знание особенностей ледового режима имеет важное практическое значение для хозяйственной деятельности региона. Оно необходимо для проектирования и эксплуатации гидротехнических сооружений, организации зимнего водоснабжения, прогнозирования паводковой ситуации и обеспечения безопасной работы речного транспорта. В условиях наблюдаемых климатических изменений актуальной задачей становится постоянный мониторинг и актуализация данных о ледовых процессах в регионе. [13]

Глава 3. Методы учета стока в зимний и переходный периоды.

3.1 Особенности определения стока в зимний период

В холодное время года определение стока усложняется из-за изменчивости и разнообразия факторов, влияющих на пропускную способность русла. Появление льда и ледяных образований на реках приводит к уменьшению пропускной способности.

Для правильного определения стока в зимний период необходимо учитывать особенности зимнего режима рек, такие как процессы замерзания и вскрытия, устойчивость ледостава, возможность образования заторов и зажоров, а также изменение водности в зимний период.

В условиях переходных периодов и временных вскрытий учет хода уровня осложняется рядом факторов:

Разнообразие ледяных образований на участке станции в рассматриваемые периоды. Невозможностью учесть степень стеснения сечения потока льдом с помощью коэффициента стеснения α , так как сплошной ледостав в эти периоды наблюдается редко, а если и наблюдается, то обычно сопровождается шугообразованием. Влияние ледяных образований, особенно зажоров и заторов, на нижележащем участке реки.

Переменный подпор от зажоров и заторов является наиболее сложным фактором, влияющим на учет уровня при вычислении стока. В некоторых случаях подпор от зажора или затора может настолько нарушить связь между расходом и уровнем, что учет хода уровня в подпорный период становится нецелесообразным.

Поэтому в переходные периоды применение простых методов учета хода уровня недостаточно. Необходимо учитывать не только ход уровня, но и другие

элементы гидрологической обстановки, а также использовать косвенные соображения для уточнения вычислений в интервалах между измерениями расходов.

Рассмотрим основные методы учета стока.

Прежде всего, необходимо провести анализ возможности построения зимних кривых стока. В зимний период можно выделить несколько ключевых фаз, для каждой из которых возможно построение отдельных кривых:

1. Переходная фаза осеннего замерзания, характеризующаяся началом формирования ледяного покрова.
2. Фаза сплошного ледостава, при которой на водоеме образуется устойчивый ледяной покров.
3. Весенний предледоходный период, предшествующий началу разрушения ледяного покрова.
4. Переходная фаза весеннего вскрытия, когда происходит разрушение ледяного покрова и начинается активное таяние.

В случае, если построение зимних кривых стока невозможно, наиболее простым и практическим методом оценки стока является интерполяция измеренных расходов воды в интервалах между точками измерений.

Для построения зимних кривых и интерполяции измеренных значений необходимо обеспечить достаточное количество данных. Однако проведение измерений в зимний период сопряжено с рядом трудностей, включая неблагоприятные погодные условия и повышенные требования к безопасности. В связи с этим при учете зимнего стока всегда стремятся максимально использовать имеющиеся данные и минимизировать влияние неопределенностей.

не только измерения расходов, но и некоторые дополнительные физические предпосылки.

Одной из таких предпосылок является предложенный С. Колупайло относительный показатель пропускной способности русла — переходный коэффициент Кзим.

Методы учета стока в зимний период описаны в следующем разделе.

3.2 Методы учета стока, используемые на гидрологической сети.

Интерполяция между измеренными расходами.

Для построения гидрографа применяется метод графической интерполяции по дискретным точкам (Q, t), соответствующим измеренным значениям расходов воды.

При построении гидрографа следует стремиться к минимизации случайных колебаний измеренных значений расходов. Это возможно только при условии высокой частоты измерений, предпочтительно 5-6 раз в месяц.

В процессе сглаживания необходимо учитывать особенности гидрологического режима водотока в рассматриваемый период. В случае отсутствия притока поверхностных вод и наличия выраженного спада расходов, сглаживание является обязательным для корректного отображения динамики водного режима. Если же расходы подвержены значительным колебаниям, сглаживание может быть нецелесообразным.

Интерполяция между измеренными значениями расходов наиболее эффективна в ситуациях, когда учет изменений уровня воды не позволяет достичь достаточной точности. Например, при наличии переменного подпора от ледяного покрова на нижележащем участке или когда поток движется поверх льда в результате его замерзания.

Этот метод также эффективен при одностороннем изменении расходов, например, зимой в условиях устойчивого ледостава и отсутствия оттепелей, при постепенном снижении расходов или на этапе подъема половодья.

Тем не менее, применение данного метода требует значительного объема измерений для обеспечения его точности и надежности.

Построение графика, иллюстрирующего динамику изменения коэффициентов в зимний период. Коэффициент $K_{зим}$ характеризует степень отклонения взаимосвязи между расходом и уровнем воды в реке в условиях ледяного покрова от типичной зависимости, наблюдавшейся в свободном русле.

$$K_{зим} = Q_{зим} / Q_0 \quad (3.1)$$

где $Q_{зим}$ - расход воды в зимний период при наличии ледяного покрова; Q_0 - расход воды при том же уровне воды, но в условиях отсутствия ледяных образований.

В рамках применения данного метода предварительно вычисляются и графически отображаются значения коэффициентов сезонной корректировки ($K_{зим}$) в зависимости от температуры (t). Эти коэффициенты используются для корректировки измеренных расходов воды в зимний период. На основе полученных данных строится хронологический график, отражающий зависимость $K_{зим}$ от температуры, выраженную функциональной зависимостью $K_{зим}=f(t)$.

Для анализа и построения графика применяются схемы, разработанные Огиевским, которые базируются на общих закономерностях, обусловленных температурными условиями и гидрологическими факторами.

В период сплошного ледостава график представляет собой плавную кривую, проходящую через контрольные точки значений $K_{зим}$. При высокой

частоте измерений линия графика может быть усреднена для повышения точности.

Хронологический график зимних переходных коэффициентов применяется в случаях, когда учет уровня воды позволяет уточнить результаты вычислений. Это актуально при условии, что колебания уровня отражают изменения расхода, однако колебания расхода могут иметь разнонаправленный характер или происходить не плавно.

Наибольшую сложность представляет использование переходных коэффициентов в периоды, характеризующиеся нестабильными гидрологическими условиями.

При построении коэффициентов сезонной корректировки в осенне-зимний период необходимо учитывать следующие факторы:

а) динамику изменения температуры воздуха и атмосферных осадков (по комплексному графику); б) информацию о характере формирования и развития ледяного покрова (включая бал ледохода, ширину и толщину заберегов, данные о шуге и т.д.); в) состояние ледовой обстановки на нижележащих участках реки, особенно в контексте возможных заторов; г) изменения уровня воды на других гидрологических постах, расположенных на данной водной артерии (по совмещенному графику); д) данные о стоке, информацию о ледовых явлениях и комплексные графики предшествующих периодов.

В случае отсутствия видимой корреляции между расходом и уровнем воды, что характерно для зажорно-заторного режима, использование зимних переходных коэффициентов недопустимо ввиду высокой вероятности грубых ошибок в расчетах.

Метод переходных коэффициентов, как и метод интерполяции расходов, основывается на графических построениях, отличающихся повышенной сложностью, и не имеет аналитического обоснования.

Для определения зимних переходных коэффициентов, учитывающих стеснение живого сечения потока ледяными образованиями, применяется методика, разработанная Л. И. Ковалевым.

Л. И. Ковалев предложил универсальные и простые методы расчета зимних расходов воды, которые базируются на функциональной зависимости $K_{зим} = f(\alpha)$. В данной зависимости степень стеснения живого сечения потока ледяными образованиями определяется коэффициентом α , представляющим собой отношение площади живого сечения ω потока, находящегося под ледяным покровом, к общей площади поперечного сечения $\omega_{полн}$, ограниченной линией уровня воды в лунке:

$$\alpha = \frac{\omega}{\omega_{полн}} = \frac{(\omega_{полн} - \omega_{пл})}{\omega_{полн}} \quad (3.2)$$

Параметр $\omega_{полн}$ (полная площадь сечения) определяет площадь поперечного сечения водного потока на конкретном уровне при условии, что русло не покрыто льдом. Параметр $\omega_{пл}$ (площадь сечения при наличии ледяного покрова) характеризует площадь поперечного сечения водного потока, когда русло полностью или частично покрыто льдом.

Для оценки применимости метода необходимо провести сравнительный анализ значений коэффициента зимнего расхода ($K_{зим}$), полученных на основе измерений расхода, с кривой, описывающей основной период ледостава. В случае превышения отклонений по ординате пределов 15–20% использование данного метода становится недопустимым.

Проведенный анализ практического применения показал, что зависимость коэффициента зимнего расхода ($K_{зим}$) от угла наклона (α) подтверждается только для рек с малыми и средними значениями водности. Экстраполяция данной зависимости на все гидрологические объекты представляется некорректной, что требует дальнейшего изучения и уточнения применимости метода в различных гидрологических условиях.

Зимние кривые расходов.

Использование зимних кривых для расчета расхода воды является эффективным методом в условиях устойчивого ледостава без оттепелей. Этот подход позволяет установить однозначную зависимость между уровнем воды и расходом, что особенно важно при наличии сплошного ледового покрова. Однако следует отметить, что данный метод применим исключительно к крупным рекам.

На средних и малых реках в период ледостава могут наблюдаться колебания уровня воды, обусловленные исключительно процессом ледообразования. Учет этих колебаний при расчете стока может привести к погрешностям.

Применение зимних кривых также затрудняется в условиях подпоров, вызванных заторами льда. Однако если подпор имеет кратковременный и ярко выраженный характер, кривые могут быть использованы в сочетании с учетом уровней воды, вызванных подпором.

Кривые расходов весеннего периода представляют собой кривые неустойчивой связи. Они отражают зависимость между расходом и уровнем воды, которая изменяется с течением времени из-за постепенного уменьшения влияния процессов ледообразования.

Срезка подпорных уровней за подпорный период.

Данный метод применяется в условиях, когда на нижележащем участке присутствует существенное воздействие ледяных образований. Границы начала и завершения периода подпора четко определяются на основе графика уровня, однако измерения расходов в течение этого периода не осуществляются.

Основная концепция метода заключается в том, что данные о уровнях за период подпора не подлежат учету.

Восстановление уровней по кривой связи с бесподпорным постом.

Для применения данного метода необходимо, чтобы гидрологические уровни на смежном гидрологическом посту не подвергались воздействию подпоров. Это подразумевает, что пост должен быть размещен ниже зоны формирования подпора или находиться за пределами области его распространения.

Метод преимущественно используется в ситуациях, когда подпор, вызванный заторами и зажорами, формируется при свободном состоянии русла как на основном, так и на смежном постах. Это обусловлено тем, что при несвободном состоянии русла получение кривой связи становится невозможным.

Основное преимущество данного метода заключается в его способности нивелировать влияние подпоров, даже в случаях, когда расход водной массы изменяется немонотонно и неравномерно в период формирования подпора.

3.3 Интерполяционно-гидравлические модели.

Исследование существующих методик учета стока в зимний период выявило их ограниченность, основанную преимущественно на графических построениях.

Интерполяционно-гидравлические модели, разработанные И. Ф. Каравесовым в ходе исследовательских работ, обладают более высокой точностью и физической обоснованностью. В 1980 году отдел гидрометрии ГГИ и сотрудники ВВУГКС под руководством И. Ф. Каравесова опубликовали рекомендации по учету стока на реках в зимний и переходные периоды, базирующиеся на этих моделях.

Преимуществом данных моделей является возможность экстраполяции пропускной способности речного русла для оперативного определения расходов воды.

Предлагаемые физико-математические модели прошли проверку ВВУГКС, показав свою эффективность по сравнению с традиционными методами, однако их внедрение было ограничено из-за отсутствия необходимой вычислительной техники на гидрологических станциях в тот период.

В настоящее время большинство гидрологических станций оснащены компьютерами, что позволяет применять методы учета стока, требующие значительных вычислительных ресурсов. Это создает предпосылки для повышения точности учета стока посредством внедрения современных методов и технологий, основанных на разработках конца прошлого века.

В связи с этим возникает необходимость обоснования перехода на новые методы учета стока.

В настоящей статье рассматриваются две методики, рекомендуемые для учета стока в зимний период на реках с устойчивым ледоставом: регрессионно-гидравлическая модель (РГМ) и модель для расчета ветви подъема гидрографа.

Регрессионно-гидравлическая модель.

В основе данной модели лежит регрессионное уравнение, в котором в качестве независимых переменных выступают факторы, оказывающие влияние на значение параметра Кзим. Один из таких факторов — шероховатость, представленная как функция времени. Данный подход позволяет учесть закономерность изменения гидравлических сопротивлений в зимний и переходный периоды.

$$x_1 = \frac{T}{T_{\text{л}}} e^{-5 \frac{T}{T_{\text{л}}}} \quad (3.3)$$

где T – время в сутках от начала ледообразования;

$T_{\text{л}}$ – продолжительность зимнего периода.

Следующие факторы, которые отражают степень стеснения русла льдом:

$$x_2 = \frac{\omega_{\text{л}}}{\omega_0}; x_4 = \frac{\omega_{\text{л}}^2}{\omega_0^2} \quad (3.4)$$

где $\omega_{\text{л}}$ – площадь погруженного льда;

ω_0 – полная площадь сечения.

Также существуют смешанные факторы:

$$x_3 = \frac{\omega_{\text{л}}}{\omega_0} \frac{T}{T_{\text{л}}} e^{-5 \frac{T}{T_{\text{л}}}}; x_5 = \frac{\omega_{\text{л}}^2}{\omega_0^2} \frac{T}{T_{\text{л}}} e^{-5 \frac{T}{T_{\text{л}}}} \quad (3.5)$$

Все факторы добавляем в уравнение множественной линейной регрессии:

$$y = K_{\text{зим}} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 \quad (3.6)$$

Включение в модель РГМ нелинейных членов (x_3 и x_5) представляется весьма перспективным, поскольку это существенно расширяет возможности регрессионного анализа.

В уравнении (3.6) не учтены факторы, которые влияют на процесс вскрытия рек ото льда. Среди них: механическое воздействие воды на ледяной покров, которое нарушает его целостность, и тепловое разрушение льда под воздействием солнечной радиации и положительных температур воздуха.

Оценка этих факторов представляет собой сложную задачу. В уравнении (3.6) совместное влияние механического и теплового факторов на вскрытие рек учтено через параметр времени.

Для получения режимных данных о стоке предлагается использовать как годовые зависимости, полученные по данным измерений текущего года, так и многолетние зависимости, полученные по всей совокупности наблюдений. Также можно использовать многолетние зависимости, учитывающие суровость зимы. При этом параметры уравнения определяются по данным измерений за весь зимний период.

Модель спада зимних расходов и истощения стока.

В условиях стабильных зим без оттепелей, одной из характерных особенностей гидрографа является снижение расхода воды по мере уменьшения запасов влаги в бассейне реки. Эта физическая тенденция лежит в основе одной из моделей гидрометрического учета стока.

Уменьшение расхода воды в период межени, включая зимнюю, происходит по экспоненциальному закону. Впервые этот закон был выведен Буссинеском как частное решение линеаризованного уравнения неустановившегося движения грунтовых вод при условии большой мощности водоносного пласта.

Однако в реальности подземное питание распределено по различным водоносным горизонтам, расположенным на разных высотах. В таких условиях кривая спада гидрографа стока может быть эффективно описана формулой, полученной Буссинеском как решение дифференциального уравнения фильтрации:

$$Q = Q_0 / (1 + \alpha_0 T)^2 \quad (3.7)$$

где α_0 — константа истощения грунтового питания, t — время.

Это уравнение относится к конкретному водоносному горизонту, где Q_0 — расход, при котором река переходит на подземное питание.

Для рек с небольшими потерями стока на ледообразование и отсутствием интенсивного снижения расходов в начале ледостава можно использовать упрощенную формулу:

$$Q_0 / Q = (1 + 2 \alpha_0 T + \alpha_0 T^2) \quad (3.8)$$

Для аппроксимации подъема гидрографа стока требуется особый подход. В большинстве случаев нарастание расходов воды в предвесенний период описывается монотонной кривой. В этом случае в качестве отправной точки используется минимальный расход воды, измеренный в начале подъема гидрографа, а сам подъем аппроксимируется зависимостью:

$$Q_t = Q_{\min} * e^{(a_0 + a_1 T)} \quad (3.9)$$

где t — время в сутках от начала подъема, a_0 и a_1 — коэффициенты регрессионного уравнения:

$$\ln(Q_t / Q_{\min}) = a_0 + a_1 T \quad (3.10)$$

Численные эксперименты показали, что эта зависимость хорошо описывает начало подъема гидрографа, но, как правило, недооценивает расходы воды в период вскрытия. Для этого периода более точные результаты дает модель РГМ.

3.4 Метод, основанный на использовании параметра Великанова.

В зимний период происходит значительное изменение гидравлического сопротивления руслового потока, особенно в период ледохода. На гидрологических постах проводятся измерения уровней воды (H), расходов (Q), толщины ледяного покрова и температуры воды (t). Однако, как правило, склоны (I) и коэффициенты шероховатости (n), которые являются ключевыми характеристиками сопротивления русла, не измеряются.

Для оценки гидравлического сопротивления целесообразно использовать комплексный параметр:

$$m = \sqrt{I/n} = \frac{QB^{2/3}}{\bar{\omega}^{5/3}} \quad (3.11)$$

где ω — площадь живого сечения потока под ледяным покровом, B — ширина русла.

Параметр m играет важную роль в динамике русловых потоков. Он был использован М. А. Великановым при разработке метода построения плана течений и является основополагающим параметром в интерполяционно-гидравлических моделях расходов воды.

Особенность параметра m , известного как параметр Великанова, заключается в его способности сохранять относительное постоянство при однородной шероховатости русла независимо от колебаний расходов воды.

С помощью параметра Великанова можно учесть изменения гидравлического сопротивления в зимний период, включая период ледохода. Также он позволяет определить расходы воды. Формула для вычисления расходов воды в этом случае имеет вид:

$$Q = \frac{m\omega^{5/3}}{B^{2/3}} \quad (3.12)$$

где величины ω и B определяются для каждого расчетного периода на основе среднесуточных уровней воды H с использованием зависимостей $\omega(H)$ и $B(H)$. Параметр m определяется методом линейной интерполяции значений, рассчитанных на основе данных измерений расходов воды.

Глава 4. Анализ результатов расчетов.

Для подтверждения эффективности новых методик было продолжено тестирование модели РГМ с целью проверки возможности применения параметра Великанова для расчета стока в зимний и переходный период.

В рамках данного исследования были выполнены сравнительные расчеты для одной реки, расположенной в Центральном Черноземье. На первом этапе оценивалось изменение гидравлического сопротивления в зимний период с использованием значений параметра Великанова, полученных на основе измерений расходов воды. Результаты расчетов представлены в таблице 4.1.

Анализ полученных данных, приведенный в таблице 4.1, показал уменьшение параметра Великанова, что свидетельствует о значительных изменениях гидравлических сопротивлений в зимний и переходный период.

Таблица 4.1 Динамика изменения характеристики Великанова (м)

река-пост	год	при св русле		в начале лдст		при устойчивом лдст		
		m	dm	m	dm	m	m min	dm
р. Оскол-сл Ниновка	1964	0,3338	0,2692	0,4174	0,1830	0,2338	0,0058	0,2279
р. Оскол-сл Ниновка	1965	0,5871	0,3255	0,4795	0,0957	0,2609	0,2309	0,0299

При определении стока в зимний и межсезонный периоды были отобраны годы с детально проработанными данными об измерениях расхода воды. Исследование базировалось на трех методах: методе переходных коэффициентов, регрессионно-гидравлической модели (РГМ) и методе, основанном на интерполяции параметра Великанова.

Эффективность этих методов была оценена путем сравнения с эталонными значениями, полученными на основе данных измерений расхода воды. В качестве эталона использовался метод переходных коэффициентов,

который до настоящего времени считается основным в данной области. Тем не менее, очевидно, что новые методы, обладающие более высоким уровнем физической обоснованности, такие как РГМ и интерполяция параметра (m), могут демонстрировать более высокую точность в определенные периоды, например, при вскрытии.

В рамках исследования были приняты ежедневные расходы воды, представленные в гидрологическом ежегоднике (Q_{rc}), в качестве эталонных значений. Расчетное уравнение регрессионно-гидравлической модели было разработано на основе данных, охватывающих весь период ледовых явлений, включая фазу свободного русла, начальный этап ледообразования и устойчивый ледостав.

Результаты численных экспериментов продемонстрировали, что для данной задачи целесообразно использовать не более трех факторов. Параметры модели РГМ представлены в таблице 4.2

Таблица 4.2 Параметры модели РГМ.

река-пост	год	Ao	A1	A2	A3	A4	A5	R	$\sigma \%$
р. Оскол-сл Ниновка	1964	0,257	0,441	1,223	0	0	0	0,96	5,55
р. Оскол-сл Ниновка	1965	0,318	0,591	13,995	0	0	0	0,98	1,64

Определение стока на основе параметра Великанова производилось с использованием следующей методики:

1. Для каждого дня проведения измерений расхода воды вычислялось значение параметра m .

2. Для дней, находящихся между датами проведения измерений расхода воды, значение параметра m определялось методом линейной интерполяции.

3. В период между измерениями расхода воды, на основе среднесуточных данных об уровне воды, определялись значения площади живого сечения потока (ω) и ширины русла (B).

4. Расход воды на данные сутки вычисляется по формуле:

$$Q = \frac{m \omega^{5/3}}{B^{2/3}} \quad (4.1)$$

В таблице 4.3 представлены результаты вычислений. В ней сопоставлены средние значения расходов, указанные в ежегоднике ($Q_{ег}$), с расходами, полученными с помощью модели РГМ ($Q_{рГМ}$), а также с расходами, определёнными с помощью линейной интерполяции параметра Великанова ($Q_{инт.м}$) и расходами полученными с помощью переходного коэффициента $K_{зим}$.

Таблица 4.3 Результаты расчета стока в зимний период.

река-пост	год	$Q_{ег}$	$Q_{рГМ}$	σ	$Q_{инт.м}$	σ	$Q_{кзим}$	σ
р. Оскол-сл Ниновка	1964	14,0	11,9	5,55	13,4	2,53	11,4	2,97
р. Оскол-сл Ниновка	1965	12,0	7,31	1,31	12,0	4,22	11,8	3,08

При сравнении результатов можно прийти к выводу, что наилучшие результаты получаются при расчете по методу Великанова.

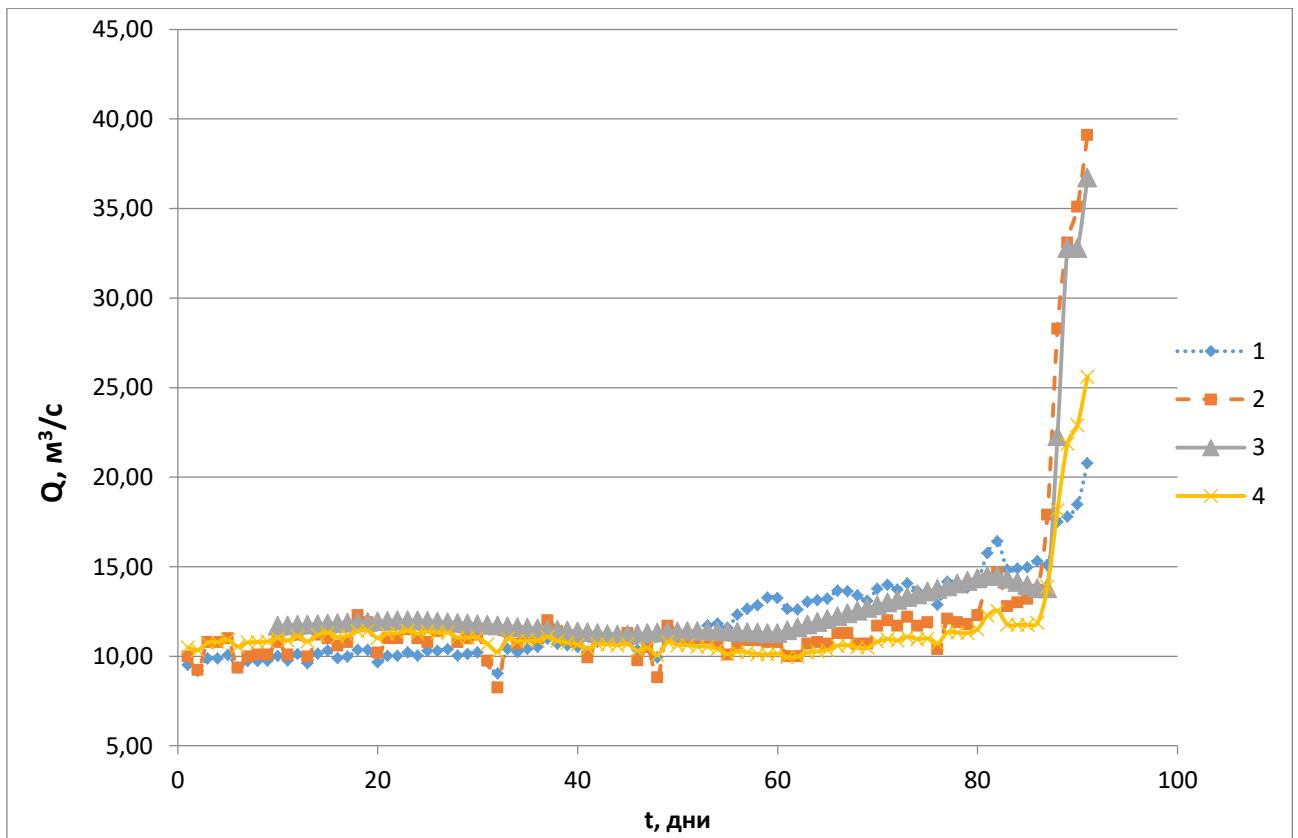


Рис.4.1. Гидрограф р. Оскол-п. Ниновка в зимний период, 1964 г. 1 – РГМ; 2 – Данные ГЕ; 3 - интерполяция m ; 4- интерполяция $K_{зим}$.

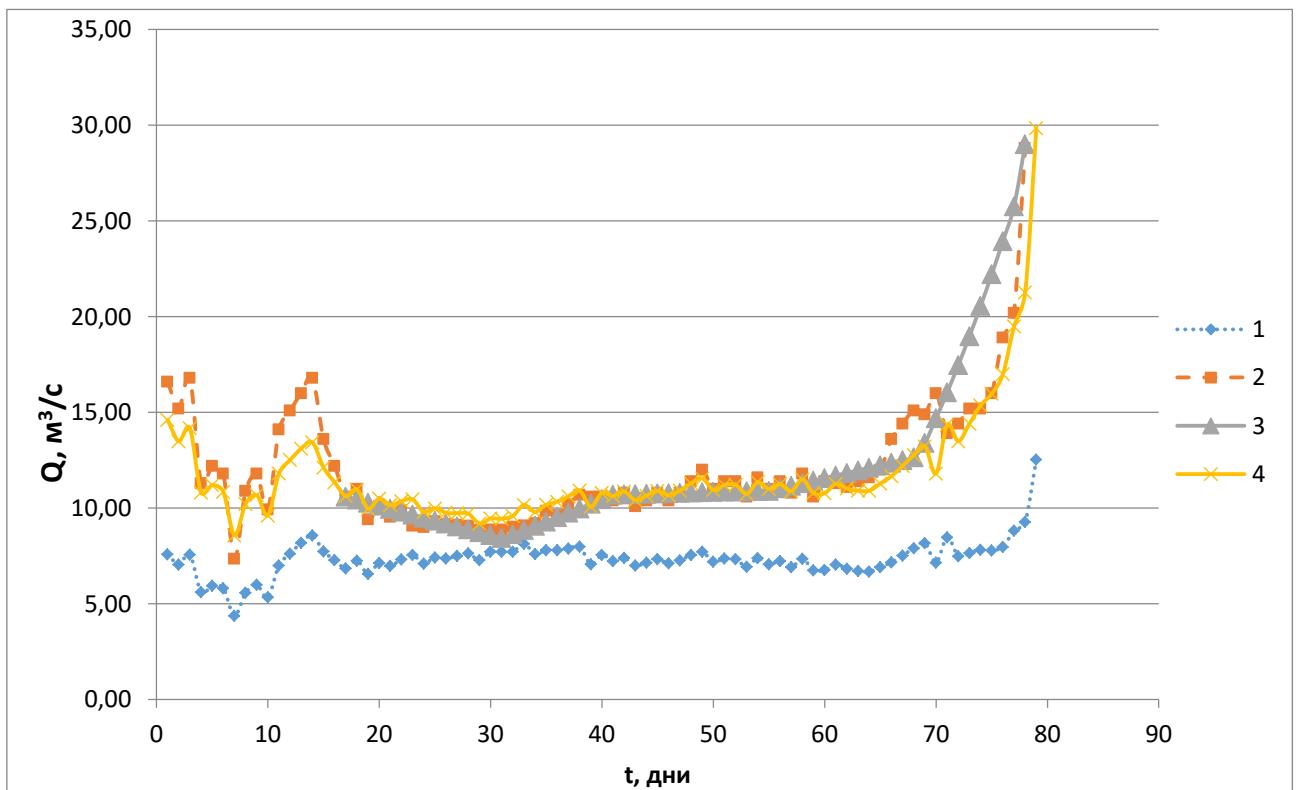


Рис.4.1. Гидрограф р. Оскол-п. Ниновка в зимний период, 1965 г. 1 – РГМ; 2 – Данные ГЕ; 3 - интерполяция m ; 4- интерполяция $K_{зим}$.

Заключение

1. Методы расчёта стока в зимний период, применяемые в настоящее время, могут давать значительные погрешности при учёте стока и не подходят для использования в компьютерных технологиях расчёта стока, поскольку основаны на графических построениях и во многом зависят от опыта специалиста.

2. Модель РГМ, несмотря на свою физическую обоснованность, не смогла обеспечить надёжные результаты. Вероятно, это связано с изменением гидравлического режима реки или неточностью исходных данных, таких как толщина льда в период заберегов и начала ледостава, а также площадь сечения ледяного покрова.

3. Параметр Великанова позволяет оценить изменение гидравлического сопротивления русла в зимний период.

4. Расчёт стока на основе интерполяции параметра Великанова даёт надёжные результаты при стандартном количестве измерений расходов воды в переходный период (4–6 измерений в месяц). Для повышения точности метода при недостаточном количестве измерений требуется дополнительная проверка.

5. Метод, основанный на интерполяции параметра Великанова, показал лучший результат, поэтому его можно рекомендовать как наиболее рациональную математическую основу для компьютерных технологий расчёта стока в зимний период.

Список литературы.

1. <https://www.homework.ru/spravochnik/centralnij-chernozemnij-ekonomiceskij-rajon/>
2. <https://bigenc.ru/c/vostochno-evropeiskaia-platforma-7a88a8>
3. https://spravochnick.ru/geografiya/vostochno-evropeyskaya_ravnina_geograficheskoe_polozhenie/relief_i_geologicheskoe_stroenie_vostochno-evropeyskoy_ravniny/#relief-vostochno-evropeyskoy-ravniny
4. <https://arz.unn.ru/2016-05-16-10-34-33/1181-2016-05-19-07-43-18>
5. <https://ecosistema.ru/08nature/world/geoussr/3-3-3.htm>
6. https://studbooks.net/1744545/geografiya/harakteristika_ostkol
7. <https://gotonature.ru/2035-reka-ostkol.html>
8. https://road-project.okis.ru/file/road-project/LecturesHydro/Lecture_8_Hydro.pdf
9. Барышников Н.Б. Гидравлические сопротивления речных русел. – СПб.: РГГМУ, 2003 118-127 с.
10. [http://library.nsawt.ru/Ледокольные%20взрывные%20работы\(Отредактированно\).pdf](http://library.nsawt.ru/Ледокольные%20взрывные%20работы(Отредактированно).pdf)
11. Тавризов В.М. Ледокольные взрывные работы. – Москва, 1967 7-14 с.
12. <https://geopolitika.cfuv.ru/wp-content/uploads/2016/11/06bukovsk.pdf>
13. Д.Е. Клименко, М.Э. Гарайшина Подсчет расходов воды в период ледостава на реках при отсутствии материалов наблюдения. - Пермский государственный университет, 2008
14. Ю.В. Шарина Методика оперативного учета стока в условиях зарастания русла (на примере реки матыра в створе села Крутое). – СПб.: ФГБУ, 2017
15. <http://elib.rshu.ru>