

УДК 556(076.5)

Методические указания «Физика атмосферы, океана и вод суши»
Раздел – «Физика вод суши» – СПб.: изд. РГГМУ, 2000 – 48 с.

Методические указания составлены в соответствии с программой дисциплины «Физика атмосферы, океана и вод суши» (Раздел – «Физика вод суши»). Даются рекомендации по изучению дисциплины. Приводятся вопросы для самопроверки, контрольная работа, а также рекомендации к выполнению курсового проекта.

Составители:

С.Д. Винников, доц. РГГМУ,
А.Н. Постников, доц. РГГМУ,
А.В. Лубяной, доц. РГГМУ.

Ответственный редактор: В.В. Коваленко, проф. РГГМУ.

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

На протяжении учебного года студенты-заочники самостоятельно изучают указанные в программе разделы физики вод суши (гидрофизики). Каждый студент должен составить подробный конспект в соответствии с программой, выникая в физическую сущность трактуемого вопроса. В случае необходимости он может обращаться к учебникам физики и химии, которые были рекомендованы на младших курсах университета.

После составления подробного конспекта (в пределах вопросов для самопроверки) всех разделов физики вод суши, иллюстрированного схемами и чертежами, студент может приступить к выполнению контрольной работы.

Заключительной частью в изучении курса физики вод суши является выполнение курсового проекта. Тема курсового проекта может быть выбрана самим студентом из числа предлагаемых в методических указаниях с учетом потребностей той организации, в которой работает студент, его личной заинтересованности, а также имеющихся материалов по выбранной теме. Если выбранная студентом тема не входит в список тем, приведенных в настоящих методических указаниях, то она должна быть прислана на кафедру гидрофизики и гидропрогнозов для утверждения.

К экзаменационной сессии студент должен иметь конспект курса физики вод суши, составленный по вопросам для самопроверки, контрольную работу и курсовой проект, проверенные преподавателем.

Во время сессии по узловым разделам курса читается цикл лекций, а также выполняются специальные работы в лаборатории.

Литература

1. Винников С. Д., Проскураков Б. В. Гидрофизика. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 248 с.
2. Мишин В. М. Практическая гидрофизика. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 176 с.
3. Пехович А. И. Основы гидрометеорологии. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 199 с.
4. Одрова Т. В. Гидрофизика водосхов вод суши. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 311 с.

УКАЗАНИЯ ПО РАЗДЕЛАМ

Введение

Необходимо обратить внимание на связь физики вод суши с другими специальными курсами, а также уяснить значение изучаемых задач в различных отраслях хозяйственной деятельности страны. При этом следует иметь в виду, что в большинстве своем гидрометеорологические явления есть суть тепловых процессов, обусловленных солнечной радиацией и теплом, поступающим из недр земли.

Литература

1. Винников С. Д., Проскуряков Б. В. Гидрофизика, 1988, с. 6–7.
2. Одрова Т. В. Гидрофизика водоемов суши, 1979, с. 7–12.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение физики вод суши (гидрофизики).
2. Назовите дисциплины, смежные с физикой вод суши.
3. Назовите отрасли хозяйственной деятельности, которые обеспечивают расчетами физика вод суши.
4. Какие вопросы изучаются в курсе физика вод суши?
5. Назовите имена ученых, внесших наибольший вклад в развитие физики вод суши.

Молекулярная физика воды в трех ее агрегатных состояниях

В настоящем разделе изучаются основные положения теории фазовых переходов воды, ее структура в трех агрегатных состояниях, а также гипотезы строения молекулы воды.

Переход воды из одной фазы в другую обусловлен изменением температуры и давления. Особое внимание необходимо обратить на явление переохлаждения воды, так как оно имеет существенное значение. Так, например, переохлаждение воды приводит к образованию внутриводного льда (шуги) и, как следствие этого, – к зажору, являющемуся стихийным гидрологическим явлением. Следует также обратить внимание на то, что от строения молекулы и структуры воды зависят физические свойства пара, воды и льда, в том числе и физические свойства, называемые аномалиями воды, изложенные в п. 2.2 учебника [1].

Литература

1. Винников С. Д., Проскуряков Б. В. Гидрофизика, 1988, с. 8–19.
2. Одрова Т. В. Гидрофизика водоемов суши, 1979, с. 13, 27.

Вопросы для самопроверки

1. Изобразите диаграмму агрегатных состояний воды и поясните ее.
2. Каким уравнением описываются кривые этой диаграммы?
3. Что такое тройная точка диаграммы?
4. Что такое переохлажденная вода?
5. Изобразите строение молекулы воды.
6. Напишите химические формулы различных видов молекулы воды.
7. Что такое молекулярно-кинетическая теория вещества?
8. В чем суть строения газа, жидкости и твердого тела согласно молекулярно-кинетической теории вещества?
9. В чем суть гипотезы строения воды, обусловленного ее водородными связями?

Основные физические свойства воды, водяного пара, льда и снега

Если в курсе физики физические свойства вещества рассматривались в целом, то в курсе физики вод суши – в применении к воде и ее смежным состояниям: льду (снегу) и водяному пару.

При изучении материала раздела обратите внимание на определения физических характеристик, их числовые значения и размерность. Постарайтесь запомнить, так как на них будет постоянно опускаться ссылка в последующих разделах курса, а также они будут необходимы при решении задач и выполнении курсового проекта.

Литература

1. Винников С. Д., Проскуряков Б. В. Гидрофизика, 1988, с. 20–51, 54–58.
2. Пехович Д. И. Основы гидрогеотермики, 1983, с. 20–33.
3. Одрова Т. В. Гидрофизика водоемов суши, 1979, с. 15–57.

Вопросы для самопроверки

1. Дайте характеристику плотности воды.
2. Дайте характеристику сжимаемости и тепловому расширению воды.
3. Назовите характерные значения температуры воды.
4. Дайте определение тепловым характеристикам воды: удельной теплоемкости, удельной теплоте кристаллизации и испарения, теплопроводности и теплопроводности.
5. Какую размерность имеют удельная теплоемкость, удельная теплота кристаллизации и испарения, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности?
6. Приведите числовые значения плотности и тепловых характеристик воды.
7. Что такое динамический и кинематический коэффициенты вязкости?
8. Дайте характеристику поверхностному натяжению воды и смачиванию ею твердых тел.

9. Что такое давление насыщенного водяного пара?
10. Перечислите основные, с вашей точки зрения, аномалии воды.
11. Дайте характеристику физических свойств льда.
12. Приведите числовые значения плотности, температуры плавления (кристаллизации), удельной теплоты плавления и удельной теплосемкости льда.
13. Приведите сведения о физических свойствах соленой воды и соленого льда.
14. От чего зависит изменение плотности снега в течение зимы? Приведите характерные ее значения.
15. Дайте характеристику воздухо- и водопроницаемости и водудерживающей способности снежного покрова.
16. Дайте характеристику тепловых и механических свойств снега.
17. Что такое режелекция, рекристаллизация, возгонка и сублимация?
18. Что такое фирнизация снега?

Основные положения теплообмена

В этом разделе рассматриваются основные понятия, законы и уравнения теории теплообмена. Они необходимы для решения задач гидротермики, которые будут освещены ниже. Поэтому на эти вопросы необходимо обратить особое внимание, а формулы (3.9), (3.15), (3.34), (3.36), (3.52), (3.59) учебника [1] следует запомнить. Следует также разбираться как в выводе основного уравнения теории теплообмена, которое носит название дифференциального уравнения теплопроводности, так и в крайних условиях, задаваемых при решении этого уравнения.

Литература

1. Винников С. Д. *Гидрофизика*, 1988, с. 52–81.
2. Пехович А. И. *Основы гидротермики*, 1983, с. 5–17, 48–55.
3. Одорова Т. В. *Гидрофизика водоемов суши*, 1979, с. 58–70.

Вопросы для самопроверки

1. Что называется стационарным и нестационарным температурным полем?
2. Как изображается плоское температурное поле?
3. Как записывается выражение для определения энthalпии тела?
4. Напишите закон Фурье.
5. Как записывается дифференциальное уравнение теплопроводности?
6. Напишите уравнение теплопроводности для стационарных условий.
7. Что такое начальные и граничные условия, необходимые для решения уравнения теплопроводности?
8. Перечислите методы решения уравнения теплопроводности.
9. Что такое источник (сток) теплоты?
10. Что такое теплопередача и теплоотдача?

11. По какой формуле определяется конвективная теплоотдача?
12. По какой формуле определяется лучистый теплообмен?
13. Дайте оценку теплоотдаче при испарении воды.
14. Как оценивается тепловой поток при теплопередаче?
15. Дайте оценку теплоте, выделяющейся при замораживании воды.

Стационарное температурное поле

Рассмотренные в предыдущем разделе законы и уравнения теории теплообмена применяются при изучении температурных полей в стационарных условиях, то есть условиях, не меняющихся с течением времени. Здесь следует больше внимания уделить методам решения уравнения теплопроводности для стационарного температурного поля. При этом следует отметить, что аналитических решений уравнения разработано очень большое число, мы же приведем в качестве примера только одно решение [1], с. 89.

Литература

1. Винников С. Д. *Гидрофизика*, 1988, с. 82–99.

Вопросы для самопроверки

1. Как записывается выражение для определения температуры в однослойной плоской стенке?
2. То же в внутреннем источнике теплоты.
3. Как записывается выражение для определения температуры в многослойной плоской стенке?
4. То же в однослойной цилиндрической стенке.
5. Как оценивается тепловой поток при теплопередаче через цилиндрическую стенку?
6. Какие методы существуют для решения уравнения Лапласа?
7. Изложите суть графического метода решения этого уравнения.
8. В чем суть метода релаксаций?
9. Изложите суть метода электротепловой аналогии.

Нестационарное температурное поле

Как и предыдущем разделе, здесь также используются законы и уравнения теории теплообмена, рассматриваются методы решения дифференциального уравнения теплопроводности для температурных полей в нестационарных условиях, то есть в условиях, меняющихся с течением времени.

Литература

1. Винников С. Д., Проскуряков Б. В. Гидрофизика, 1988, с. 100 – 120.

Вопросы для самопроверки

1. В чем суть графической формы метода конечных разностей, применяемого для решения уравнения теплопроводности для одномерного температурного поля?
2. В чем суть табличной формы метода конечных разностей, применяемого для решения уравнения теплопроводности для одномерного температурного поля?
3. Как записывается условие Шмидта?
4. То же для двумерного температурного поля.
5. Как определяется скорость промерзания (оттаивания) почвогрунта?
6. Приведите одно из аналитических решений уравнения теплопроводности для нестационарных условий.
7. В чем суть метода изучения температурных полей на моделях?
8. Как записываются индикаторы и критерии подобия?

Гидротермический расчет водоемов и водотоков

Для решения целого ряда задач по определению температуры воды водоемов и водотоков используют дифференциальное уравнение температурного поля турбулентного потока, которое также называют уравнением энергии. Это уравнение является одним из основных уравнений курса физика вод суши. Поэтому в выводе этого уравнения следует хорошо разобратся, а само уравнение запомнить. Часть составляющих уравнения (имеется в виду сумма тепловых потоков) нам уже известна по разделу «Основные положения теплообмена». Формулы для определения других составляющих также следует запомнить, ибо они применяются и при решении многих других гидрофизических задач, встречающихся в практике гидролога.

Литература

1. Винников С. Д., Проскуряков Б. В. Гидрофизика, 1988, с. 121 – 148.
2. Мишон В. М. Практическая гидрофизика, 1983, с. 5 – 52.
3. Пехович А. И. Основы гидроледотермики, 1983, с. 12 – 15.
4. Одрова Т. В. Гидрофизика водоемов суши, 1979, с. 182 – 203.

Вопросы для самопроверки

1. Напишите уравнение энергии.
2. То же для непероточного водоема.
3. Напишите уравнение теплового баланса для поверхности водоема и перечислите его составляющие.
4. Как рассчитывается прямая и рассеянная солнечная радиация?

5. Как рассчитывается количество теплоты, приносимое водами притоков, грунтовыми водами, осадками?
6. В чем суть метода изоклин?
7. В чем суть метода суперпозиций?
8. Изложите расчет изменения температуры воды вдоль водотока (реки, канала) для установившегося температурного режима.
9. На чем основан тепловой расчет водохранилища-охладителя?
10. Какова физическая природа конвективных течений в водоеме?
11. Познайте образование конвективных течений в ятелях Венгрии и при циркуляции Лентмюра.
12. Как осуществляется определение коэффициентов теплопроводности и теплопроводности в лабораторных условиях?

Ледотехнический расчет водоемов и водотоков

Значительную часть года водоемы и водотоки нашей страны находятся под ледяным покровом. Помимо этого, в переходные периоды года – от лета к зиме и наоборот – на этих объектах имеют место такие явления как заторы, образование внутриводного льда и другие. Поэтому, для успешного ведения хозяйственной деятельности в стране, необходимо знать физику этих явлений и уметь рассчитывать и прогнозировать (для борьбы с ними, а иногда с целью использования в своей деятельности). Например, рассчитывается толщина льда для транспортировки по нему тяжелых грузов.

В этом разделе трудно выделить наиболее важные вопросы. Все они имеют практическую ценность и являются самостоятельными.

Литература

1. Винников С. Д., Проскуряков Б. В. Гидрофизика, 1988, с. 149 – 181.
2. Мишон В. М. Практическая гидрофизика, 1983, с. 52, 79 – 84, 110 – 163.
3. Пехович А. И. Основы гидроледотермики, 1983, с. 86 – 96, 112 – 123.
4. Одрова Т. В. Гидрофизика водоемов суши, 1979, с. 205 – 256, 265 – 281.

Вопросы для самопроверки

1. Как происходит формирование ледяного покрова?
2. Как рассчитывается рост ледяного покрова?
3. В чем суть расчета площади полыньи в нижнем бьефе ГЭС?
4. В чем суть расчета количества шуги, образующейся в нижнем бьефе ГЭС?
5. Как образуется зазор?
6. Как происходит разрушение ледяного покрова?
7. Как образуется затор?

8. Как рассчитывается статическое давление ледяного покрова при его температурном расширении?
9. Назовите виды динамических нагрузок от льда на гидротехнические сооружения.
10. Как определяется временное сопротивление льда на сжатие и изгиб?

Испарение с поверхности воды, снега, льда и почвы

В настоящем разделе изучаются физические предпосылки и теоретические основы различных методов расчета испарения. Отметим, что из рассмотренных методов в оперативных расчетах применяется только метод эмпирических формул, остальные находят применение в специальных исследованиях. Обратите внимание, что в основу всех эмпирических формул положен так называемый закон Дальтона — формула (8.24) учебника [1]. Заметим также, что важность изучения испарения не ограничивается только тем, что устанавливается величина слоя испарившейся влаги. Нам уже известно, что при испарении температура воды понижается. Значение происходящей при этом теплоотдачи в окружающую среду рассчитывается по формуле (3.33). Используется оно в теплотехнических расчетах водоемов и водотоков. Включение величины испарения в уравнения водного и теплового балансов указывает на важность изучения этого явления.

Литература

1. Винников С. Д., Проскуряков Б. В. Гидрофизика, 1988, с. 182 — 201.
2. Митон В. М. Практическая гидрофизика, 1983, с. 84 — 94.
3. Одрова Т. В. Гидрофизика водоемов суши, 1979, с. 154 — 181.

Вопросы для самопроверки

1. Опишите механизм испарения с поверхности воды.
2. Назовите основные факторы, определяющие испарение.
3. В чем суть расчета испарения методом водного баланса?
4. То же методом теплового баланса.
5. То же методом турбулентной диффузии.
6. То же методом эмпирических формул.
7. Как рассчитывается испарение с поверхности снега и льда?
8. Как рассчитывается испарение почвенной влаги?

Вода в почвогрунтах и снежном покрове

Вода в почвогрунтах и снеге, как в пористых средах, может находиться в жидком и парообразном виде, а в замерзшем грунте и в твердом виде. Часть жидкой влаги неподвижна, другая часть и парообразная влага передвигаются по вертикали и по горизонтали. Это движение влаги обусловлено определенными силами и описывается дифференциальным уравнением влагопереноса (9.13) [1]. Указанное уравнение может быть применено для описания движения влаги в частных случаях: только по вертикали, только по горизонтали, при изотермических условиях и др. В некоторых простейших случаях эти уравнения интегрируются.

Твердые осадки, выпавшие на поверхность земли с течением зимы, могут накапливаться, образуя снежный покров. Они принимают участие в круговороте воды после перехода их в жидкое или парообразное состояние. Фазовый переход из твердого в жидкое состояние происходит под воздействием теплового потока, который поступает из атмосферы и грунта. Запас воды в снеге и интенсивность ее поступления на поверхность почвогрунта — основные гидрологические характеристики, необходимые для оценки стока весеннего половодья.

В разделе рассматриваются процессы, происходящие в снежном покрове — его нагревание, таяние снега, движение талых вод в снежной толще, водоотдача снега. Особое внимание следует обратить на влияние на эти процессы физических свойств снега как многофазной среды, состоящей из кристаллов льда, воды и воздуха, содержащего водяной пар.

Литература

1. Винников С. Д., Проскуряков Б. В. Гидрофизика, 1988, с. 202 — 218.
2. Богословский Б. Б., Самохин А. А., Иванов К. Е., Соколов Д. П. Общая гидрология, 1984, с. 55 — 71.

Вопросы для самопроверки

1. Каким уравнением описывается передвижение влаги в водонасыщенной почве?
2. Напишите уравнение неразрывности влагопереноса.
3. Какие виды влаги, содержащейся в почвогрунтах, и силы, действующие на нее, вы знаете?
4. Что такое суммарный потенциал почвенной влаги?

5. Напишите дифференциальное уравнение влагопереноса в почве и поясните его составление.
6. В чем особенность уравнения влагопереноса при установившемся и неустановившемся режимах?
7. Изложите физику мерзлогого течения грунта.
8. Опишите механизм изменения физических свойств снега при таянии снежного покрова.
9. Как рассчитывается водоудерживающая способность снега?
10. Назовите наиболее существенные составляющие уравнения теплового баланса для периода снеготаяния.
11. Приведите формулы для расчета ежедневных значений составляющих теплового баланса поверхности снега.
12. Что такое фирнизация снега и как она сказывается на лавинообразовании?

Акустические, оптические и электромагнитные явления в воде

В этом разделе рассматриваются явления в воде, обусловленные прохождением через нее звуковых и электромагнитных волн. Некоторые из этих явлений нашли объяснение и с успехом используются в целях народного хозяйства. Другие, как например, изменение свойств воды, после прохождения ее через магнитное поле, еще окончательно не объяснены. Отметим, что в учебнике рассмотрена только самая небольшая часть явлений, имеющих приложение в практической деятельности гидролога.

Литература

1. Винников С. Д., Проскуряков Б. В. Гидрофизика, 1988, с. 219 – 242.
2. Одрова Г. В. Гидрофизика водоемов суши, 1979, с. 61 – 64.

Вопросы для самопроверки

1. Как записывается волновое уравнение?
2. Какова скорость звука в различных средах и от каких факторов она зависит?
3. От чего зависит поглощение звука и как рассчитать поглощение звуковой энергии?
4. Как рассчитывается отражение звуковой волны от поверхности, разделяющей две среды?
5. Назовите диапазоны частот различных звуковых волн.
6. Приведите примеры применения ультразвука в гидрологии.
7. Чем объясняется различие оптических свойств воды?
8. Как рассчитывается поглощение и рассеяние водой лучистой энергии?
9. Как определяется прозрачность и цвет воды?
10. В чем суть поляризационно-оптического метода исследования потоков?
11. Чем объясняются необычные свойства опалесcentной воды?
12. Что такое электроосмос?

13. Что такое электрофорез?
14. Что такое потенциал протекания и потенциал седиментации?
15. Что такое двойной электрический слой?

Методы определения некоторых воднотермических и механических констант материалов

При выполнении теплотехнических и других расчетов в применении к водоемам и водотокам используются различные константы, характеризующие тепловые, механические и другие свойства материала. Числовые значения этих констант для воды, льда и снега приводятся в разделе «Физические свойства воды, льда, снега и водяного пара». Здесь же необходимо рассмотреть методы определения физических констант воды и льда.

Литература

1. Винников С. Д., Проскуряков Б. В. Гидрофизика, 1988, с. 20 – 51, 77 – 81, 177 – 181.
2. Пехович А. И. Основы гидрогеотермики, 1983, с. 20 – 33.

Вопросы для самопроверки

1. В чем суть метода определения коэффициента теплопроводности?
2. В чем суть метода определения коэффициента температуропроводности?
3. В чем суть метода определения временного сопротивления льда на сжатие?
4. То же на изгиб.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Общие указания

Контрольная работа предназначена для формирования навыков самостоятельного решения типовых задач физики вод суши (гидрофизики) и применения на практике знаний, полученных в ходе изучения дисциплины.

Контрольная работа состоит из четырех задач, в которых рассмотрены вопросы термического расчета водоемов, водотоков и снеговой нагрузки покрова. При решении студенты закрепляют знания по таким разделам гидрофизики, как физические свойства воды, льда и снега; основные положения теплообмена; стационарные и нестационарные температурные поля; гидротермический и ледотермический расчеты водоемов и водотоков. Во всех задачах расчеты производятся для одного водного объекта-водохранилища (либо его нижнего бьефа), находящегося в зимних условиях. Исходные данные к задачам едины. К ним относятся метеорологические условия, морфометрические и гидрологические характеристики объекта. Из всего комплекса исходных данных студент выбирает лишь те величины, которые необходимы для решения конкретной задачи.

Задачи контрольной работы составлены по вариантам. Номер варианта соответствует двум последним цифрам зачетной книжки.

В каждой задаче вначале приводится тема теоретического вопроса, затем формулировка задачи и исходные данные, необходимые для выполнения расчета. В зависимости от степени сложности дается краткое или подробное пояснение, в котором излагается порядок решения задачи, приводятся ссылки на уравнения и формулы, которые необходимо использовать в расчетах.

Контрольная работа выполняется в учебной тетради. При этом должно быть записано условие задачи, приведены исходные данные своего варианта и подробное решение. Схему к задаче, приведенную в методическом указании, в тетрадь переносить не обязательно. Если требуется построить график, то построение делается либо непосредственно в тетради, либо на миллиметровой в выбранном масштабе. Все расчеты выполняются в системе СИ.

Для получения зачета по контрольной работе студент должен выписать контрольную работу до начала лабораторно-экзаменационной сессии. Работа, выполненная студентом не по своему варианту, не зачитывается.

Исходные данные

Водоохранилище расположено на широте $\varphi = 50^\circ \text{с.ш.}$

Расчетный период: декабрь – январь

Характеристики водохранилища

Последняя цифра номера зачетной книжки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Глубина h , м	4	4	5	5	5	8	8	10	10	10
Ширина B , м	200	200	250	250	250	400	400	500	500	500
Расход Q , м ³ /с	10	15	20	25	30	50	55	65	70	75

Таблица 1

Метеорологические данные (среднедекадные значения):

температура воздуха θ_a , парциальное давление водяного пара e_a , скорость ветра ω_a , общая облачность N_o

Таблица 2

Последняя цифра номера зачетной книжки	Период времени	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
θ_a , $^\circ\text{C}$	Первая декада января	-14	-16	-18	-20	-22	-24	-26	-28	-30	-32
e_a , гПа		2,2	1,7	1,3	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
ω_a , м/с		5,6	5,2	4,8	4,4	4,0	3,6	3,2	2,8	2,4	2,0
N_o	Первая декада декабря	1,0	1,0	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0	0
θ_a , $^\circ\text{C}$		-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13	-14
ω_a , м/с		6,6	6,2	5,8	5,4	5,0	4,6	4,2	3,8	3,4	3,0

Характеристики слоя свежеснявшего снега:

толщина δ , плотность ρ_1

Таблица 3

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
δ , м	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,09
ρ_1 , кг/м ³	140	160	180	200	220	240	160	280	300	320

Начальная температура воды

Таблица 4

Последняя цифра номера зачетной книжки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_w, ^\circ\text{C}$	1,2	1,2	1,4	1,4	1,4	1,8	1,8	2,0	2,0	2,0

Теплоприток от лоя

Таблица 5

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$q_{\text{лр}}, \text{Вт/м}^2$	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38

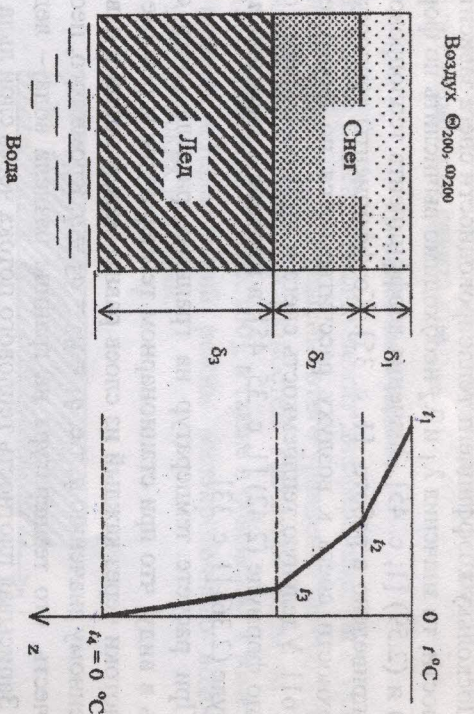
Задача 1

Расчет температуры в снеговой ледяной покрове водоема

Водоем покрыт трехслойной снеговой ледяной толщей, состоящей из слоев свежевыпавшего снега, уплотненного снега и льда (рис. 1). Допуская, что в первой декаде января наблюдается стационарный метеорологический режим, необходимо: 1) вычислить плотность теплового потока q через снеговой ледяную толщу; 2) рассчитать значения температуры t_1, t_2, t_3 на границах раздела слоев; 3) построить график распределения температуры $t = f(z)$; 4) подсчитать теплоосдержание снеговой ледяной толщи площадью 1 м².

Исходные данные:

- 1) мощность слоя свежевыпавшего снега δ_1 , мощность слоя уплотненного снега $\delta_2 = 0,05$ м, толщина льда $\delta_3 = 0,20$ м;
- 2) плотность соответствующих слоев снега: ρ_1 и $\rho_2 = 500$ кг/м³;
- 3) метеорологические данные: среднедекадные значения температуры воздуха θ_2 и скорости ветра w_2 на высоте 2 м в первой декаде января;
- 4) скорость течения воды в водохранилище подо льдом $v = 0,1$ м/с.

Рис. 1. Схема снеговой ледяной толщи и кривая зависимости $t = f(z)$.

Пояснения к задаче

Для нахождения плотности теплового потока необходимо использовать формулу (3.42) [1, с. 69]. Поскольку в задаче передача теплоты от воды к воздуху происходит не через один слой, а через трехслойную толщу, в знаменатель указанной формулы следует

вместо $\frac{\delta}{\lambda}$ подставить величину $\sum_{i=1}^3 \frac{\delta_i}{\lambda_i}$, где δ_i и λ_i — соответственно

толщины и коэффициенты теплопроводности отдельных слоев, i — номер слоя. Формула (3.42) предназначена для расчета плотности теплового потока через стенку, материал которой не меняет свое агрегатное состояние. В нашей же задаче стенка состоит из льда — материала, меняющего свое агрегатное состояние. В связи с этим вся теплота, проходящая от воды ко льду, будет расходоваться на таяние его и за границу раздела (в толщу) не пройдет. Поэтому в формуле (3.42) слагаемое $\frac{1}{\alpha_1}$ следует исключить.

$$\lambda_1 = -13,52$$

$$\lambda_2 = -3,05$$

$$\lambda_3 = -8,142$$

Поскольку коэффициент теплопроводности снега зависит от его плотности, то значения λ_1 и λ_2 необходимо вычислить по формулам (2.58) и (2.59) [1, с. 45]. Значения коэффициента теплопроводности льда приведено в работе [1, с. 35]. Коэффициенты теплоотдачи от поверхности снега к воздуху рассчитываются по формуле (3.19) [1, с. 61]. Удельную теплоемкость снега и льда необходимо определить по формуле (2.42) [1, с. 35, 45], а плотность льда при $n = 0$ по формуле (2.36) [1, с. 33].

При расчете температур на границах раздела слоев следует иметь в виду, что при стационарном температурном режиме тепловые потоки через каждый из слоев равны между собой и равны вычисленному значению q , т.е. $q_1 = q_2 = q_3 = q$. Кроме того, необходимо учесть, что температура на границе раздела вода — лед равна 0°C . Записывая плотность теплового потока через слой льда в соответствии с законом Фурье, можно рассчитать температуру t_3 . Далее, рассматривая плотность теплового потока через слой уплотненного снега, рассчитывается температура t_2 . Аналогичным образом находится температура на поверхности снега t_1 (см. [1, с. 83 — 84]). По результатам расчета температуры строится график ее распределения по толщине снеговой дна покрова.

Задача 2

Расчет распределения температуры воды по глубине подо льдом слабопроточного водохранилища

После интенсивного ветрового перемешивания воды в водохранилище произошло ее замерзание. В 7 часов 1 декабря наблюдалось распределение температуры, показанное на рис. 2 (кривая 1). Рассчитать, через сколько часов (суток) установится стационарный температурный режим, характеризующийся линейным распределением температуры (рис. 2, кривая 2). Построить графики распределения температуры по глубине $t = f(z)$ для отдельных моментов времени.

Исходные данные:

- 1) глубина водохранилища h , ширина поперечного сечения B , расход воды Q ;

- 2) начальная температура воды t_n в момент замерзания t_0 ;
- 3) теплоприток от грунта дна $q_{\text{дн}}$.

Пояснения к задаче

В основе решения задачи лежит дифференциальное уравнение теплопроводности. Для решения этого уравнения целесообразно использовать метод конечных разностей. Расчетная формула этого метода (5.6) приведена в [1, с. 100], а также в пояснении к тематическому проекту «Термический режим малопроточного водоема» данных методических указаний.

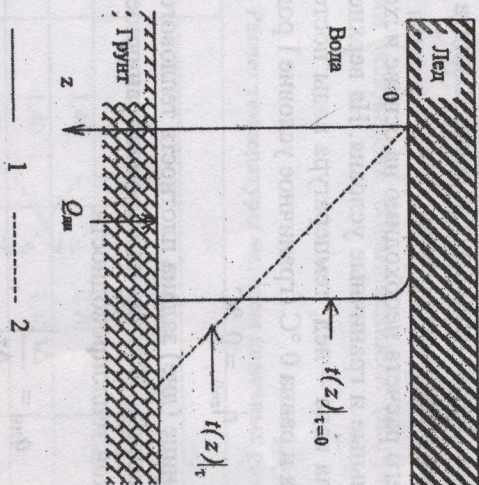


Рис. 2. Начальное — 1 и расчетное (стационарное) — 2 распределение температуры по глубине водохранилища

Порядок вычислений следующий. Прежде всего необходимо определить коэффициенты турбулентной теплопроводности λ_r и температуропроводности воды a_r . Для расчета коэффициента λ_r воды при наличии ледяного покрова рекомендуется пользоваться формулой К. И. Россинского (2.24) [2, с. 53]. При этом следует обратить внимание, что в пояснении к формуле допущена опечатка. Входящее в эту формулу значение удельного расхода воды, т.е. расхода,

Поскольку коэффициент теплопроводности снега зависит от его плотности, то значения λ_1 и λ_2 необходимо вычислить по формулам (2.58) и (2.59) [1, с. 45]. Значения коэффициента теплопроводности льда приведено в работе [1, с. 35]. Коэффициенты теплоотдачи от поверхности снега к воздуху рассчитываются по формуле (3.19) [1, с. 61]. Удельную теплоемкость снега и льда необходимо определить по формуле (2.42) [1, с. 35, 45], а плотность льда при $n = 0$ по формуле (2.36) [1, с. 33].

При расчете температур на границах раздела слоев следует иметь в виду, что при стационарном температурном режиме тепловые потоки через каждый из слоев равны между собой и равны вычисленному значению q , т.е. $q_1 = q_2 = q_3 = q$. Кроме того, необходимо учесть, что температура на границе раздела вода — лед равна 0°C . Записывая плотность теплового потока через слой льда в соответствии с законом Фурье, можно рассчитать температуру t_3 . Далее, рассматривая плотность теплового потока через слой уплотненного снега, рассчитывается температура t_2 . Аналогичным образом находится температура на поверхности снега t_1 (см. [1, с. 83 — 84]). По результатам расчета температуры строится график ее распределения по толщине снежного покрова.

Задача 2

Расчет распределения температуры воды по глубине под льдом слабопроточного водохранилища

После интенсивного ветрового перемешивания воды в водохранилище произошло ее замерзание. В 7 часов 1 декабря наблюдательное распределение температуры, показанное на рис. 2 (кривая 1). Рассчитать, через сколько часов (суток) установится стационарный температурный режим, характеризующийся линейным распределением температуры (рис. 2, кривая 2). Построить графики распределения температуры по глубине $t = f(z)$ для отдельных моментов времени.

Исходные данные:

- 1) глубина водохранилища h , ширина поперечного сечения B , расход воды Q ;

- 2) начальная температура воды t_n в момент замерзания t_0 ;
- 3) теплоприток от грунта дна $q_{\text{дн}}$.

Пояснения к задаче

В основе решения задачи лежит дифференциальное уравнение теплопроводности. Для решения этого уравнения целесообразно использовать метод конечных разностей. Расчетная формула этого метода (5.6) приведена в [1, с. 100], а также в пояснении к тематическому проекту «Термический режим малопроточного водоема» данных методических указаний.

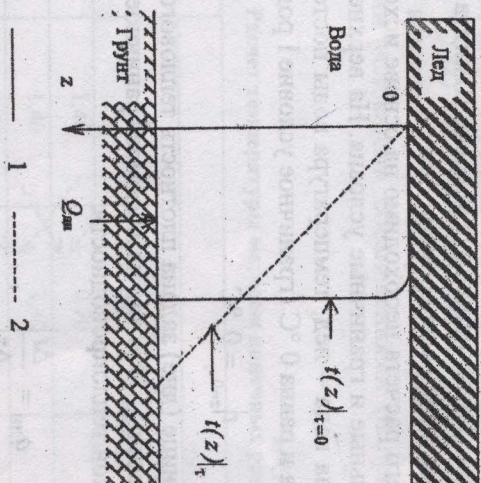


Рис. 2. Начальное — 1 и расчетное (стационарное) — 2 распределение температуры по глубине водохранилища

Порядок вычислений следующий. Прежде всего необходимо определить коэффициенты турбулентной теплопроводности λ_T и температуропроводности воды a_T . Для расчета коэффициента λ_T воды при наличии ледяного покрова рекомендуется пользоваться формулой К. И. Россинского (2.24) [2, с. 53]. При этом следует обратить внимание, что в пояснении к формуле допущена опечатка. Входящее в эту формулу значение удельного расхода воды, т.е. расхода,

приходящегося на единицу ширины поперечного сечения водохранилища, необходимо подставлять в размерности $\text{м}^2/\text{ч}$, а не $\text{м}^2/\text{с}$.

Коэффициент турбулентной теплопроводности рассчитывается по соотношению

$$\alpha_t = \frac{\lambda_t}{c\rho}, \quad (\text{м}^2/\text{с}) \quad (1)$$

$C = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$

где c и ρ — соответственно удельная теплоемкость и плотность воды.

Далее необходимо установить, на каких глубинах и для каких моментов времени будет производиться расчет температуры воды. Применительно к данной задаче целесообразно задать следующие интервалы по глубине: $\Delta z = 0,25$ м для глубины 4–5 м и $\Delta z = 0,5$ м для глубины 6–10 м. Затем, используя условие Шмидта [1, с. 100], вычисляем расчетные интервалы времени $\Delta \tau$.

Для дальнейшего расчета необходимо на основе исходных данных записать начальные и граничные условия. На верхней границе, т. е. границе раздела вода — лед, температура воды постоянна в течение всего периода и равна 0°C (граничное условие I рода):

$$t|_{z=0} = 0^\circ\text{C}. \quad (2)$$

На нижней границе (дне) задана плотность теплового потока от грунта к водной массе $q_{\text{дн}}$. Это так называемое граничное условие II рода. Используя закон теплопроводности,

$$q_{\text{дн}} = \left. \frac{\Delta t}{\Delta z} \right|_{z=h}, \quad (3)$$

где $\frac{\Delta t}{\Delta z}$ — градиент температуры воды в придонном слое (на глубине $z = h$), можно перейти к граничному условию I рода. Записывая в (3)

$\Delta t = t|_{z=h} - t|_{z=h-\Delta z}$, получаем температуру воды на дне водоема

$$t|_{z=h} = t|_{z=h-\Delta z} + \frac{q_{\text{дн}}}{\lambda_t} \Delta z. \quad (4)$$

В этой формуле $t|_{z=h}$ — температура воды на дне, т. е. при $z = h$, а $t|_{z=h-\Delta z}$ — температура воды на глубине $h - \Delta z$, которая вычисляется по расчетной формуле (5.6) [1].

Параллельно с расчетом температуры на нижней границе следует вести расчет температуры воды на заданных глубинах Δz , $2\Delta z$ и т. д. в определенные моменты времени τ_0 , $\tau_0 + \Delta \tau$, $\tau_0 + 2\Delta \tau$ и т. д.,

где τ_0 — начальный момент времени, за который, согласно условию задачи, принимается 7 часов 1 декабря. Вычисления удобно производить в табличной форме (см. табл. 6, см. также табл. 9). По результатам расчетов строятся графики распределения температуры по глубине $t = f(z)$ для отдельных моментов времени. Для большей наглядности кривые $t = f(z)$ следует построить в одних координатах с различными условиями обозначениями (например, различными цветами).

Расчет температуры методом конечных разностей

Таблица 6

z	t				
	τ_0	$\tau_0 + \Delta \tau$	$\tau_0 + 2\Delta \tau$	...	τ_n
0	0	0	0	...	0
Δz	1,40	0,70			
$2\Delta z$	1,40	1,40			
$3\Delta z$	1,40				
	1,40				
$h - \Delta z$	1,40	1,40			
h	1,40	$t _{z=h}$			

Задача 3

Расчет температуры воды по длине водотока

При работе ГЭС вода из водохранилища сбрасывается в нижний бьеф. При этом в зимних условиях образуется полынья. Рассчитать длину этой полыньи (рис. 3).

Исходные данные:

- 1) местоположение водохранилища (φ ° с. ш.) и расчетный период — первая декада января;
- 2) расход и температура сбрасываемой воды соответственно $Q_{сбр}$ и $t_b = 0,5$ °C;
- 3) ширина реки в нижнем бьефе $e = 0,1$ B;
- 4) метеорологические данные: температура и парциальное давление водяного пара воздуха соответственно θ_2 и e_2 , скорость ветра ω_2 , общая облачность N_0 , нижняя облачность отсутствует.

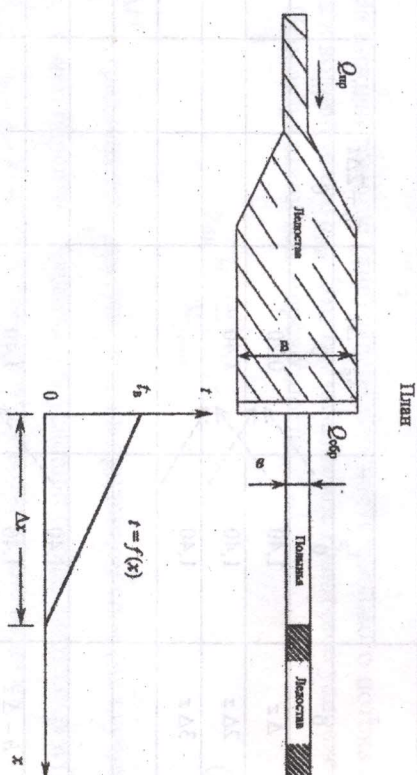


Рис. 3. Схема к расчету длины полыньи

Пояснения к задаче

Задача решается с использованием уравнения теплового баланса водотока, которое приводится в учебнике [1, с. 137, формула (6.40)]. Числитель правой части этого уравнения представляет собой теплообмен водной поверхности с атмосферой, состоящей из радиационного баланса, теплоотдачи испарением и конвективного теплообмена. Тепловым потоком через ложе пренебрегаем. Это означает, что происходит теплоотдача от водной поверхности в атмосферу. Следует иметь в виду, что в зимних условиях все три слагаемых имеют отрицательный знак. В результате этого температура воды по длине водотока будет понижаться и на некотором расстоянии Δx от плотины станет равной 0 °C (см. рис. 3). Таким образом, искомое значение длины полыньи Δx равно длине участка, на котором происходит понижение температуры воды на величину $\Delta t = 0 - t_b$.

Расчет суммы тепловых потоков ($\sum Q$) рекомендуем производить по формулам П.П. Кузьмина (1.13), В.А. Рышши и Р.В. Донченко (1.16) и (1.18), которые приведены в учебном пособии [2, с. 13, 15]. Трудоемкий расчет радиационного баланса значительно упрощается, если воспользоваться приведенными там же табл. 1.6–1.8. В указанные расчетные формулы входит температура поверхности воды t_n и давление насыщенного водяного пара e_0 , зависящее от t_n . Это значительно усложняет расчет, так как температура меняется по длине водотока, а следовательно, меняется и величина теплоотдачи. Однако в рассматриваемом случае диапазон изменения температуры воды Δt невелик и поэтому можно в качестве температуры поверхности воды t_n принять постоянное значение, равное среднему значению температуры на участке Δx , т. е.

$$t_n = \frac{t_0 + 0}{2} = 0,5 t_0.$$

Задача 4

Расчет нарастания толщины льда

Образование льда на водоеме началось 1 декабря. Рассчитать, какой толщины достигнет ледяной покров к концу месяца: 1) в центральной части водоема, где снег на поверхности отсутствует; 2) у

берега, где лед покрыт свежавывалившим снегом. По полученным результатам сделать вывод о влиянии снега на интенсивность нарастания льда.

Исходные данные:

- 1) метеорологические данные: среднедекадные значения температуры воздуха θ_2 и скорости ветра ω_2 за первую декаду декабря; в течение двух последующих декад среднедекадная температура воздуха понизилась соответственно на 4 и 5 °C, а скорость ветра не менялась;
- 2) данные о высоте и плотности снега на льду у берега: в первой декаде снег отсутствовал; во второй декаде $h_{\text{сн}} = 0,08$ м; в третьей декаде $h_{\text{сн}} = 0,12$ м; плотность снега принять равной ρ_1 .

Пояснения к задаче

Для расчета толщины льда используются теоретические формулы (7.21) и (7.22) [1, с. 155]. Расчет производится по декадным интервалам времени, что позволяет рассчитать толщину льда на конец каждой декады. Поскольку начало расчета совпадает с началом ледообразования, то для первой декады в формуле (7.22) начальная толщина льда h_0 принимается равной нулю. Для последующих декад в качестве начальной толщины льда используется значение толщины льда, рассчитанное на конец предыдущей декады. Коэффициент теплоотдачи α , входящий в расчетную формулу, определяется по зависимостям (3.18) и (3.19) [1, с. 61], исходя из наличия либо отсутствия снега на поверхности льда. Коэффициенты теплопроводности льда и снега принять по данным задачи 1; удельная теплота ледообразования приведена в работе [1, с. 34].

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Основной целью курсового проекта является развитие у студентов навыков самостоятельной работы в области различных проблем физики вод суши. Проект должен способствовать углублению знаний, полученных студентом при изучении теоретического курса, и может иметь различный характер (теоретический, расчетный или экспериментальный), однако во всех случаях он должен быть посвящен количественному изучению явлений, происходящих в воде в природных условиях, путем использования физико-математических методов исследования.

Приступая к выполнению проекта, студент прежде всего должен ознакомиться с имеющейся по исследуемому вопросу научной литературой, а затем собрать все необходимые сведения об объекте исследования. Содержание курсового проекта должно отвечать следующей приближенной схеме: оглавление, введение, физико-географическое описание объекта, существующие методы расчета, исходные данные, расчет характеристики, заключение, список использованной литературы, приложение (если оно имеется).

Во введении обосновывается важность выбранной темы, раскрывается ее практическая и научная значимость. Дается краткая справка по состоянию изучаемого вопроса. Формулируются цели и задачи данной работы.

В первом параграфе «Физико-географическое описание объекта» прежде всего дается описание самого объекта и территорий, находящихся в непосредственной близости к нему. При этом наиболее подробно должны быть приведены сведения, напрямую связанные с темой данной работы. Например, при выполнении темы 4 желательно привести сведения о среднемесячных датах установления и разрушения ледяного покрова, характерных значениях толщины льда, об изменении толщины льда в течение зимы, высоте и плотности снега на поверхности льда и т. п. Понятно, что эти сведения могут оказаться излишне подробными при выполнении работы по другой теме.

В этом же параграфе можно осветить уровень гидрометеорологической изученности данного района, т.е. привести данные о гидрометеорологической сети наблюдений (количество метеостанций и гидрологических постов, период их существования и т. п.). Желательно привести схему района, на которой указаны объект исследований с прилегающими территориями, а также метеостанции и гидрологические посты.

Во втором параграфе «Существующие методы расчета» дается описание всех известных методов расчета рассматриваемой характеристики. Последовательно излагается сущность каждого метода, приводятся его основные уравнения (формулы), обсуждаются достоинства и недостатки, возможность применения для данного объекта. Приведенный анализ позволяет дать обоснование выбору метода, которым будет пользоваться исследователь при выполнении проекта.

В третьем параграфе «Расчет характеристики», под которой понимается либо температура воды, льда, снега, либо толщина льда и т. п., в самом начале указывается, по какому методу будут проводиться расчеты. Объясняется целесообразность применения именно этого метода. В табличной и, если есть необходимость, в графической форме приводятся исходные данные, позволяющие выполнить расчет изучаемой характеристики.

Интервалы времени, за которые проводятся расчеты, указаны в кратких пояснениях к каждому проекту.

Результаты расчетов сводятся в удобные для сравнения и анализа таблицы, а также представляются в графической форме. Например, ход испарения за теплый период, рассчитанного по нескольким формулам, представляется на едином графике.

Приводится подробный анализ полученных результатов и их сравнение с данными натурных наблюдений, если таковые имеются. Делается попытка объяснить, почему, например, одна формула дает выше, а другая, наоборот, занижает рассматриваемую величину, если расчет выполнялся по нескольким формулам. Показать, почему надо больше доверять результатам, полученным по той или иной формуле и т.п. Здесь исполнитель демонстрирует свою эрудицию в рассматриваемых вопросах и глубину их понимания.

В разделе «Заключение» подводятся итоги. Кратко упоминаются основные результаты (выводы), полученные в ходе выполнения работы. Выказываются соображения (если таковые имеются) о том, что следовало бы учесть в будущих исследованиях по данной теме.

В списке литературы приводятся все литературные источники (монографии, статьи, гидрологические ежегодники, метеорологические ежемесячники и т.д.), которые использовались при выполнении работы. Каждый из источников должен быть упомянут в тексте в соответствующем месте.

Раздел «Приложение» не обязателен. Необходимость в нем возникает тогда, когда имеются довольно обширные материалы, например, большие таблицы, содержащие те или иные сведения, многочисленные графики, т.е. все то, что затрудняет текст основной записки, мешает вести изложение, отвлекает внимание при чтении. Ссылки на табличные и графические материалы, помещенные в этот раздел, делаются также, как на аналогичные материалы, приведенные по тексту.

Курсовой проект должен иметь титульный лист, отвечающий установленной форме, быть аккуратно сброшюрован. Проект, по желанию исполнителя, может быть отпечатан или написан от руки и представлен на факультет заочного обучения в установленные сроки. Условия выбора темы курсового проекта приведены в разделе «Общие указания» к настоящему методическим указаниям.

В этом же параграфе можно осветить уровень гидрометеорологической изученности данного района, т.е. привести данные о гидрометеорологической сети наблюдений (количество метеостанций и гидрологических постов, период их существования и т. п.). Желательно привести схему района, на которой указаны объект исследований с прилегающими территориями, а также метеостанции и гидрологические посты.

Во втором параграфе «Существующие методы расчета» дается описание всех известных методов расчета рассматриваемой характеристики. Последовательно излагается сущность каждого метода, приводятся его основные уравнения (формулы), обсуждаются достоинства и недостатки, возможность применения для данного объекта. Приведенный анализ позволяет дать обоснование выбору метода, которым будет пользоваться исследователь при выполнении проекта.

В третьем параграфе «Расчет характеристики», под которой понимается либо температура воды, льда, снега, либо толщина льда и т. п., в самом начале указывается, по какому методу будут проводиться расчеты. Объясняется целесообразность применения именно этого метода. В табличной и, если есть необходимость, в графической форме приводятся исходные данные, позволяющие выполнить расчет изучаемой характеристики.

Интервалы времени, за которые проводятся расчеты, указаны в кратких пояснениях к каждому проекту.

Результаты расчетов сводятся в удобные для сравнения и анализа таблицы, а также представляются в графической форме. Например, ход испарения за теплый период, рассчитанного по нескольким формулам, представляется на едином графике.

Приводится подробный анализ полученных результатов и их сравнение с данными натурных наблюдений, если таковые имеются. Делается попытка объяснить, почему, например, одна формула завывает, а другая, наоборот, занижает рассматриваемую величину, если расчет выполнялся по нескольким формулам. Показать, почему надо больше доверять результатам, полученным по той или иной формуле и т.п. Здесь исполнитель демонстрирует свою эрудицию в рассматриваемых вопросах и глубину их понимания.

В разделе «Заключение» подводятся итоги. Кратко упоминаются основные результаты (выводы), полученные в ходе выполнения работы. Высылаются соображения (если таковые имеются) о том, что следовало бы учесть в будущих исследованиях по данной теме.

В списке литературы приводятся все литературные источники (монографии, статьи, гидрологические ежегодники, метеорологические ежемесячники и т.д.), которые использовались при выполнении работы. Каждый из источников должен быть упомянут в тексте в соответствующем месте.

Раздел «Приложение» не обязателен. Необходимость в нем возникает тогда, когда имеются довольно обширные материалы, например, большие таблицы, содержащие те или иные сведения, многочисленные графики, т.е. все то, что затрудняет текст основной записки, мешает вести изложение, отвлекает внимание при чтении. Ссылки на табличные и графические материалы, помещенные в этот раздел, делаются также, как на аналогичные материалы, приведенные по тексту.

Курсовой проект должен иметь титульный лист, отвечающий установленной форме, быть аккуратно сброшюрован. Проект, пожеланию исполнителя, может быть отпечатан или написан от руки и представлен на факультет заочного обучения в установленные сроки. Условия выбора темы курсового проекта приведены в разделе «Общие указания» к настоящему методическим указаниям.

ПРИМЕРНЫЕ ТЕМЫ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Тема 1. Ветровое волнение на водоеме и методика расчета элементов волн

В курсовом проекте в первую очередь следует осветить вопрос о практическом значении изучения волнения вообще и для исследуемого водоема в частности. Затем необходимо привести физико-географическое описание и дать климатическую характеристику района и изучаемого объекта. При этом большее внимание надо уделить ветровому и волновому режимам.

При описании особенностей конкретного водоема необходимо привести все данные о характере волнения об условиях его образования на отдельных участках водоема и о методике исследования его элементов (пункты и сроки наблюдений, приборы, установки).

Итак, в частности, вопрос об изучении на объекте одного из важнейших элементов волнений — высоты волны, следует проанализировать данные наблюдений и установить характер влияния ветра на высоту волны, т. е. выяснить, при каких ветрах (по скорости и направлению) наблюдается слабое, сильное, максимальное волнение, отвечают ли сроки наблюдений задаче изучения режимных стадий волнения (нарастающее, установившееся, затухающее волнение); имеется ли для отдельных пунктов и направлений ветров связь между высотой волны и скоростью ветра, каким коэффициентом корреляции характеризуется эта связь. Если указанная связь отсутствует, то следует объяснить это обстоятельство.

Аналогичным образом необходимо осветить методику и результаты изучения других элементов волнения на данном водоеме (длина и крутизна волны, скорость ее распространения, период).

Затем надо перейти к расчету элементов волн по эмпирическим и теоретическим формулам (формулы В. Г. Андриянова, Н. Д. Шишова, В. В. Шулейкина, метод А. П. Браславского, метод Е. М. Седюк и др.).

Описание методов расчета и сам расчет целесообразнее привести в курсовом проекте отдельно для каждого элемента волнения.

При этом следует пользоваться перечисленными в прилагемом списке литературы работами.

В заключении студенту следует сопоставить результаты расчета, полученные различными методами, между собой, а также с данными непосредственных наблюдений и соответствующим образом их оценить.

Литература

1. Лато Д. Д., Спрекалов С. С., Завьялов В. К. Нагрузки и воздействия ветровых волн на гидротехнические сооружения. — Л., 1990. — 432 с.
2. Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохозяйств. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983, с. 190 — 194.
3. Волны, течения и водные массы водоемов. Конспект лекций / Под ред. проф. Б. В. Богословского. — Л., изд. ЛГМИ, 1980, с. 4 — 25.
4. Судовский А. С. Динамические явления в водоемах. — Л.: Гидрометеоиздат, 1991. — 263 с.
5. Давидан И. Н., Лопатухин Н. И., Рожков В. А. Ветровое волнение в Мировом океане. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. — 256 с.

Тема 2. Испарение с водной поверхности водоема по данным наблюдений и расчета

Во введении курсового проекта студенту необходимо осветить вопрос о практическом значении изучения проблемы испарения с водной поверхности вообще и для исследуемого водоема в частности, а также сформулировать основную задачу, поставленную в курсовом проекте. Затем надо описать объект исследования, привести при этом все необходимые сведения о районе расположения водоема, а также о тех характеристиках водоема, которые оказывают влияние на режим испарения с его водной поверхности (например, защищенность берегов от ветра, водная растительность, глубина водоема, распределение температуры поверхности воды по водоему и т.п., если такие данные имеются).

При описании климатических условий района следует привести за расчетный период (безледоставный период года) все имеющиеся данные о ходе метеорологических элементов, оказывающих влияние на интенсивность испарения с поверхности водоема (температура воздуха, скорость ветра, абсолютная влажность и др.). Режим изменения значений метеорологических элементов во времени для на-

гидности надо представить графически (в виде совмещенного хронологического графика).

В курсовом проекте важно подробным образом описать пункты наблюдений (их месторасположение, тип), указать программу работ на них и методику выполнения наблюдений (приборы, особенности их установки, сроки наблюдений), изложить и проанализировать методы расчета испарения. Расчет величины испарения с поверхности водоема должен быть выполнен по ряду формул (методов), наиболее часто применяемых на практике. Большинство эмпирических формул для определения величины испарения с водной поверхности основано на соотношении Дальтона, которое имеет вид

$$E = \varepsilon_0(e_0 - e_2), \quad (1)$$

где E — слой испарившейся воды; ε_0 — коэффициент пропорциональности, зависящий в основном от скорости ветра; e_0 — давление насыщенного водяного пара при температуре испаряющей поверхности воды; e_2 — парциальное давление водяного пара на высоте 2 м.

Для определения значения ε_0 , которое в первую очередь зависит от скорости ветра, существует много эмпирических формул, полученных разными авторами на основе обобщения результатов лабораторных или полевых экспериментов. Однако эти формулы не учитывают все факторы, влияющие на испарение, и в силу этого дают различные результаты.

К формулам, основанным на законе Дальтона, относятся широко известные расчетные формулы В. К. Давылова, Б. Д. Зайкова, П. И. А. П. Браславского и др. Эти формулы и сведения об условиях их использования и примеры расчета приводятся в ряде учебных пособий, в частности, в работе [9].

Испарение с водоема изучается за теплый (безледоставный) период одного года. Значения испарения рассчитываются за каждый месяц этого периода по трех-четырем эмпирическим формулам, наиболее часто применяемым на практике [4, с. 182 — 195]. Для того, чтобы проводить расчеты по этим формулам необходимо знать температуру поверхности воды, а также температуру и влажность воздуха и скорость ветра, измеренные непосредственно над водной

поверхностью. Эти условия могут быть выполнены, если ведутся наблюдения по приборам, установленным на пилоту в водоеме, для которого изучается испарение. В этом случае, при работе с формулами, используются средние за расчетный интервал времени (месяц или декада) значения температуры поверхности воды и воздуха, влажности воздуха и скорости ветра, приведенной к уровню 2 м над испаряющей поверхностью, по формуле (1.20) из работы [8, с. 16]. Однако такие наблюдения ведутся только в случае выполнения специальных исследований. Поэтому приходится использовать данные наблюдений на береговых (континентальных) метеостанциях и, следовательно, задача расчета испарения с поверхности водоема несколько усложняется. Для ее решения следует обратиться к работе [8], где необходимо ознакомиться со способами определения температуры поверхности воды в разделе «Термика водоемов и водотоков» (с. 36 — 50). Внимательное изучение сс. 15 — 18, 84 — 93 позволит научиться определять скорость ветра, а также температуру и влажность воздуха над поверхностью водоема, используя данные наблюдений на береговой метеостанции.

Следует иметь в виду, что если в расчетных формулах, например в формуле А. Р. Константинова, предусматривается использование значения скорости ветра на высоте 1 м над испаряющей поверхностью, то для перехода от значений скорости ветра, измеренных на высоте флюгера (z_ϕ), к значениям скорости ветра на высоте, требуемой формулой, надо пользоваться логарифмическим законом, устанавливающим соотношение между значениями скоростей на двух высотах:

$$w = \frac{\lg z/z_0}{\lg z_\phi/z_0} w_\phi, \quad (2)$$

где w — скорость ветра на высоте $z < z_\phi$; w_ϕ — скорость ветра на высоте z_ϕ ; z_0 — параметр шероховатости.

В частности, подставляя в формулу (2) значения $z_0 = 0,03$ м и $z = 1$ м, получаем соотношение для перехода от скорости ветра w_ϕ ,

измеренной на высоте z_ϕ , к скорости ветра на высоте 1 м следующего вида:

$$w = \frac{1,523}{\lg z_\phi + 1,523} w_\phi \quad (3)$$

Давление насыщенного водяного пара в воздухе при температуре испаряющей поверхности воды e_0 , входящее в расчетные формулы, определяется по прилагаемой таблице 7.

Давление насыщенного водяного пара, гПа

Таблица 7

Температура воздуха, °С	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	6,1	6,2	6,2	6,2	6,3	6,3	6,4	6,4	6,5	6,5
1	6,6	6,6	6,7	6,7	6,8	6,8	6,9	6,9	7,0	7,0
2	7,0	7,1	7,2	7,2	7,3	7,3	7,4	7,4	7,5	7,5
3	7,6	7,6	7,7	7,7	7,8	7,8	7,9	8,0	8,0	8,1
4	8,1	8,2	8,2	8,3	8,4	8,4	8,5	8,5	8,6	8,7
5	8,7	8,8	8,8	8,9	9,0	9,0	9,1	9,2	9,2	9,3
6	9,4	9,4	9,5	9,5	9,6	9,7	9,7	9,8	9,9	10,0
7	10,0	10,1	10,2	10,2	10,3	10,4	10,4	10,5	10,6	10,6
8	10,7	10,8	10,9	11,0	11,0	11,1	11,2	11,2	11,3	11,4
9	11,5	11,6	11,6	11,7	11,8	11,9	12,0	12,0	12,1	12,2
10	12,3	12,4	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8	12,9	13,0	13,0
11	13,1	13,2	13,3	13,4	13,5	13,6	13,7	13,8	13,8	13,9
12	14,0	14,1	14,2	14,3	14,4	14,5	14,6	14,7	14,8	14,9
13	15,0	15,1	15,2	15,3	15,4	15,5	15,6	15,7	15,8	15,9
14	16,0	16,1	16,2	16,3	16,4	16,5	16,6	16,7	16,8	17,0
15	17,1	17,2	17,3	17,4	17,5	17,6	17,7	17,8	18,0	18,1
16	18,2	18,3	18,4	18,5	18,7	18,8	18,9	19,0	19,1	19,3
17	19,4	19,5	19,6	19,8	19,9	20,0	20,1	20,3	20,4	20,5
18	20,6	20,8	20,9	21,0	21,2	21,3	21,4	21,6	21,7	21,8
19	22,0	22,1	22,3	22,4	22,5	22,7	22,8	23,1	23,1	23,2
20	23,4	23,5	23,7	23,8	24,0	24,1	24,3	24,4	24,6	24,7
21	24,9	25,0	25,2	25,4	25,5	25,7	25,8	26,0	26,1	26,3
22	26,5	26,6	26,8	26,9	27,1	27,3	27,4	27,6	27,8	27,9
23	28,1	28,3	28,5	28,6	28,8	29,0	29,2	29,3	29,5	29,7
24	29,9	30,0	30,2	30,4	30,6	30,8	31,0	31,1	31,3	31,5
25	31,7	31,9	32,1	32,3	32,5	32,7	32,9	33,0	33,2	33,4

Литература

1. Бибкин В. И. Испарение с водной поверхности. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 77 с.
2. Браславский А. П., Вихулина З. А. Нормы испарения с поверхности водохранилищ. — Л.: Гидрометеоиздат, 1954. — 212 с.
3. Братсерт У. Х. Испарение в атмосфере. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. — 351 с.
4. Винников С. Д., Проскураков Б. В. Гидрофизика. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988. с. 182 — 201.
5. Зайков Б. Д. Испарение с водной поверхности прудов и малых водохранилищ на территории СССР. — Тр. ГТИ, 1949, вып. 21. — 54 с.
6. Изучение и расчет элементное водного баланса. Ч. 2. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979, с. 82 — 100.
7. Константинов А. Р. Испарение в природе. Изд. 2-е. — Л.: Гидрометеоиздат, 1968. — 532 с.
8. Митин В. М. Практическая гидрофизика. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. с. 84 — 110.
9. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов. — Л.: Гидрометеоиздат, 1969. — 83 с.

Тема 3. Определение шугонпродуцирующей площади поймы нижнего бьефа ГЭС

Работа выполняется для некоторого водотока, расположенного на широте 60°. Расчет производится для февраля месяца. Необходимые исходные данные представлены в таблице 8.

Прежде всего следует объяснить шугонпродуцирующую способность поймы вообще и для нижнего бьефа ГЭС в частности. Затем необходимо перейти к непосредственному расчету площади поймы.

Задача расчета поймы распадается на две части: гидравлический и тепловой расчеты.

Гидравлический расчет сводится к построению плана течений в нижнем бьефе ГЭС по методу В. В. Проскуракова, изложенному в учебном пособии [3]. Описание метода построения плана течений можно также найти в методических указаниях по гидромеханике для студентов III курса ФЗО. При этом расчет плана выполняется только с учетом продольного равновесия потока — первый этап расчета (второй и третий этапы построения плана течений в целях упрощения задачи не рассматриваются). Основное отличие изложенного в этих пособиях от того, что предстоит сделать в курсовой работе, заключается в следующем. При описании метода построения

плана течений в названных работах предполагается наличие плана русла в изобатах, с помощью которого и определяется глубина на промерных вертикалях. В курсовой же работе глубина прямолинейного русла H в поперечных сечениях задается по формуле

$$H = H_{\max} \left[1 - \left(\frac{2y}{B} \right)^k \right], \quad (1)$$

где $H_{\max}$ — максимальная глубина (м); y — расстояние, отсчитанное от продольной оси потока до промерной вертикали (м); k — показатель степени здесь принят равным 4.

За плотинной, у одного из берегов, при расширении потока, выходящего из сбросного отверстия, образуется водоворот. Названный выше метод не предусматривает наличия водоворотных зон. Поэтому размеры этого водоворота, или, что одно и то же, границу между водоворотом и выходящим из сбросного отверстия потоком следует определить по формуле Н. М. Бернадского [1, 2]:

$$b = b_0 \frac{h_0}{h} e^{\frac{g l^2}{C_{\text{ср}}^2 h_{\text{ср}}}}, \quad (2)$$

где b_0 и b — ширина струи потока в начальном и конечном сечениях выделенного участка длиной l ; h_0 и h — средние глубины в этих же сечениях; $h_{\text{ср}}$ — средняя глубина потока в пределах выделенного участка; $C_{\text{ср}}$ — средний коэффициент Шези на этом участке; g — ускорение свободного падения.

Указанный метод построения плана течений предусматривает наличие для нижнего бьефа плана русла в изобатах. Должны быть также известны отметка горизонта воды, ширина фронта сброса воды через плотину в нижний бьеф B_0 , расход сбрасываемой воды Q и коэффициент шероховатости русла в нижнем бьефе n . Построенный план течений должен содержать не менее 4 — 5 струй, по которым проходит одинаковый расход воды $Q_{\text{ср}}$.

Тепловой расчет выполняется после того, как будет построен план течений. Для его выполнения используется следующее уравнение теплового баланса для потока [1, 2]:

$$c\rho \frac{Q_{\text{ср}}}{\epsilon_{\text{ср}}} \frac{dt}{dx} = Q, \quad (3)$$

где c и ρ — удельная теплоемкость и плотность воды; $\epsilon_{\text{ср}}$ — ширина струи; t — температура воды; x — продольная координата; Q — потери теплоты с поверхности воды, состоящие из теплоотдачи испарением, конвекцией, из потерь на излучение и т. д. Поток теплоты через дно составляет небольшую величину, поэтому им следует пренебречь.

По уравнению теплового баланса (3) расчет делается не только для каждой струи в отдельности, но и для отдельных участков струи, так как ее ширина является переменной. В результате этого расчета должны получиться кривые падения температур вдоль струи [2]. Число кривых должно равняться числу струй.

По построенным графикам можно теперь определить для каждой струи расстояние от начального створа до точки с нулевой температурой. Линия, соединяющая точки с нулевой температурой (нулевая изотерма), и будет границей между полынней и ледяным покровом.

Чтобы определить шугопродуцирующую площадь, необходимо выполнить указанный выше тепловой расчет (определить границу полынни) для двух моментов времени — начало и конец похолодания. Разницы площадей между нулевыми изотермами полынни, полученные по этим расчетам, и будет шугопродуцирующей площадью полынни — $F_{\text{ш}}$. Количество шуги (расход шуги), которое должно образоваться в потоке с открытой водной поверхностью $F_{\text{ш}}$, определяется [1, 2] по формуле

$$Q_{\text{ш}} = \frac{Q_0}{L_{\text{кр}}} F_{\text{ш}}, \quad (4)$$

Q_0 — теплоотдача с водной поверхности при нулевой температуре; $L_{\text{кр}}$ — удельная теплота кристаллизации.

Исходные данные

№ варианта	Ширина русла, B , м	Расход воды, Q , m^3	Максимальная глубина, $H_{\max}$, м	Шероховатость русла, n	Ширина фронта сброса воды, B_0 , м	Температура сбрасываемой воды, t_w , °C	Скорость ветра, м/с		Температура воздуха, °C		Влажность воздуха, гПа		Облачность в долях единицы	
							w_2	w'_2	θ_2	θ'_2	e_2	e'_2	N'	N''
1	200	50	2	0,015	30	4,0	2	4	-0,5	-15	3,1	0,9	0,7	0,2
2	200	20	3	0,015	40	4,0	2	4	-1,0	-16	3,1	0,9	0,7	0,2
3	200	50	4	0,015	50	4,0	2	4	-1,5	-17	3,1	0,9	0,7	0,2
4	200	100	5	0,015	30	4,0	2	4	-2,0	-18	3,1	0,9	0,7	0,2
5	200	100	6	0,015	40	4,0	2	4	-2,5	-19	3,1	0,9	0,7	0,2
6	200	100	2	0,015	50	4,0	2	4	-3,0	-20	3,1	0,9	0,7	0,2
7	300	150	3	0,015	50	4,0	2	4	-3,5	-21	3,1	0,9	0,7	0,2
8	300	150	4	0,015	60	4,0	2	4	-4,0	-22	3,1	0,9	0,7	0,2
9	300	150	5	0,015	70	4,0	2	4	-4,5	-23	3,1	0,9	0,7	0,2
10	300	200	6	0,015	50	4,0	2	4	-5,0	-24	3,1	0,9	0,7	0,2
11	300	200	2	0,015	60	4,0	2	4	-0,5	-25	3,1	0,9	0,7	0,2
12	400	200	3	0,015	60	4,0	2	4	-1,0	-26	3,1	0,9	0,7	0,2
13	400	250	4	0,015	50	4,0	2	4	-1,5	-27	3,1	0,9	0,7	0,2
14	400	250	5	0,015	60	4,0	2	4	-2,0	-28	3,1	0,9	0,7	0,2
15	400	250	6	0,015	70	4,0	2	4	-2,5	-29	3,1	0,9	0,7	0,2
16	400	300	2	0,015	70	4,0	2	4	-3,0	-30	3,1	0,9	0,7	0,2
17	500	300	3	0,015	80	4,0	2	4	-3,5	-31	3,1	0,9	0,7	0,2
18	500	300	4	0,015	90	4,0	2	4	-4,0	-32	3,1	0,9	0,7	0,2
19	500	350	5	0,015	90	4,0	2	4	-4,5	-33	3,1	0,9	0,7	0,2
20	500	350	6	0,015	100	4,0	2	4	-5,0	-34	3,1	0,9	0,7	0,2

Примечание. 1. Сбросное отверстие шириной B_0 расположено у одного из берегов. 2. Значение метеовеличин приведены на начало и конец волны холода. 3. Облачность в начале волны холода низкая, а в конце высокая. 4. Студент-заочник выбирает тот номер варианта, который совпадает с последней цифрой номера его зачетной книжки (или двумя последними).

Литература

1. Бибиков Д. Н., Петруничев Н. Н. Ледовые затруднения на гидроэлектростанциях. М. - Л.: Госэнергоиздат, 1950, с. 49 - 56, 152 - 157.
2. Винников С. Д., Проскураков Б. В. Гидрофизика. - Л.: Гидрометеозиздат, 1988, с. 149 - 160.
3. Винников С. Д. Гидромеханика для гидрологов суши. - СПб.: РГГМУ, 1998, с. 48 - 59.
4. Каргушев А. В. Гидравлика рек и водохранилищ. - Л.: Речной транспорт, 1955, с. 61 - 82.
5. Лед в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС. - Л.: Гидрометеозиздат, 1983. - 199 с.
6. Рекомендации по расчету длины полыньи в нижних бьефах ГЭС. - Л., 1986, П 25-86/ВНИИГ. - 39 с.
7. Рышча В. А., Донченко Р. В. Исследование теплопотерь с открытой водной поверхностью в зимнее время. - Тр. ГТИ, 1958, вып. 65, с. 54 - 83.
8. Браславский А. П., Кумарина М. Н., Смирнова М. Е. Тепловое влияние объектов энергетики на водную среду. - Л.: Гидрометеозиздат, 1989. - 252 с.

Тема 4. Зимний термический и ледовый режимы водоема (водотока)

Для выполнения курсового проекта по этой теме студент, помимо общих сведений о водоеме (водотоке), должен собрать относящиеся к зимнему периоду материалы гидрометеорологических наблюдений (данные о температуре воздуха, ветре, температуре воды, о ледовых явлениях и т.п.). На основании этих данных следует составить описание зимнего термического и ледового режимов водного объекта. При этом необходимо рассмотреть все наблюдаемые в водном объекте ледовые явления, описать их природу, а также условия, при которых они имеют место, сроки и районы их появления, и изложить используемые на данном объекте методы исследования. Например, рассматривая вопрос об образовании устойчивого ледостава, следует привести сведения об интенсивности нарастания толщин льда и продолжительности его стояния, сведения о толщине льда и снега как на различных участках объекта, так и на одном и том же участке в различные по метеоусловиям зимы (мягкие, умеренные, суровые).

После описания зимнего термического и ледового режимов водного объекта необходимо выполнить расчет одного из наблю-

даемых на данном объекте ледовых явлений. Например, выполнить расчет интенсивности нарастания толщины ледяного покрова за весь период устойчивого ледостава. В процессе решения этой задачи следует пользоваться теоретическими формулами, рекомендуемыми в работах [1 - 6] и др. При этом необходимо количественно оценить степень влияния толщины снегового покрова на интенсивность нарастания льда.

При выполнении расчетов толщины ледяного покрова следует использовать и эмпирические формулы. Известно, что большинство эмпирических формул, предложенных исследователями для различных регионов имеют вид

$$h_n = \varphi \left(\sum_0^n \theta_2 \right)^n, \quad (1)$$

где φ , n - постоянные; $\sum_0^n \theta_2$ - сумма средних суточных отрицательных температур воздуха на высоте 2 м за расчетный период t .

Изучая специальную литературу по данной теме, студент должен разобраться в структуре эмпирических формул типа (1), составить таблицу значений параметров φ , n , указав фамилии исследователей и названия объектов, для которых эти значения параметров вычислены.

Студент может сделать попытку установить значение параметров φ и n в формуле (1) для исследуемого им водного объекта. При наличии достаточно большого количества данных синхронных наблюдений над толщиной ледяного покрова и температурой воздуха студент может попытаться получить собственную формулу вида (1). Для этого нужно прологарифмировать значения толщины льда (h_n), взятые по нарастающей, и соответствующие им суммы температур воздуха $\sum_0^n \theta_2$. Затем, на миллиметровой бумаге, выбрав соответствующие масштабы, построить систему координат: $\ln \left| \sum_0^n - \theta_2 \right|$ - ось абсцисс; $\ln h_n$ - ось ординат. В этой системе нанести точки, соответ-

ствующие каждой паре значений $\ln h_n$ и $\ln \left| \sum_0^n - \theta_2 \right|$. Затем по совокупности всех точек провести осредненную прямую, которая описывается уравнением вида

$$\ln h_n = \ln \varphi + n \ln \left| \sum_0^n - \theta_2 \right|. \quad (2)$$

Если прямую на графике продолжить до пересечения с осью ординат, то она пересечет последнюю в точке $\ln h_{n_0} = \ln \varphi$. Величина n равна тангенсу угла наклона α построенной прямой, который можно легко определить, взяв две точки на прямой. Если первая из этих точек имеет координаты $\left[\ln \left| \sum_0^n - \theta_2 \right|, (\ln h_{n_1}) \right]$, а вторая

$\left[\ln \left| \sum_0^n - \theta_2 \right|, (\ln h_{n_2}) \right]$, то

$$n = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\left(\ln \left| \sum_0^n - \theta_2 \right| \right)_2 - \left(\ln \left| \sum_0^n - \theta_2 \right| \right)_1}{(\ln h_{n_2})_2 - (\ln h_{n_1})_1}. \quad (3)$$

После этого нужно только по величине $\ln \varphi$ определить значение φ . При определении параметров формулы φ и n толщину льда удобнее выражать в см.

Полученные по различным формулам расчетные данные о нарастании ледяного покрова должны быть сопоставлены между собой, а также с данными наблюдений. Для большей наглядности ход изменения количественных характеристик явлений во времени и результаты сопоставления величин следует иллюстрировать соответствующими графиками и таблицами.

В заключении студент должен сделать конкретные выводы, к которым он пришел в результате выполнения работы, и, по возможности, привести свои соображения о задачах и путях дальнейших исследований зимнего термического и ледового режимов данного объекта.

1. Вибиков Д. Н., Петруничев Н. Н. Ледовые затруднения на гидроэлектростанциях. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1950, с. 9—21, 60—64.
2. Донченко Р. В. Ледовый режим рек СССР. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987, — 247 с.
3. Винников С. Д., Проскураков Б. В. Гидрофизика. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988, с. 149—156.
4. Заиков Б. Д. Очерки по озероведению. — Л.: Гидрометеоиздат, 1955, с. 224—268.
5. Лед в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983, — 199 с.
6. Пехович А. И. Основы гидрометеорологии. — Л.: Энергоатомиздат, 1983, с. 33—42, 86—96.
7. Чажков А. Н. Формирование ледяного покрова и пространственное распределение его толщин. — Л.: Гидрометеоиздат, 1990, — 125 с.

Темы 5, 6. Термический режим малопроточного водоема (озера, водохранилища) за безледоставный период

Для выполнения курсового проекта в первую очередь следует составить краткий физико-географический очерк водоема. При этом в очерке должны быть приведены характеристики, необходимые для его выполнения. Такими характеристиками являются: площадь зеркала и средняя глубина озера (водохранилища), данные о сроках замерзания и окончательного освобождения водоема от льда, о метеорологической обстановке в течение безледоставного периода (среднемесячные характеристики температуры воздуха и облачности) и др. Кроме того, необходимы данные хотя бы эпизодических кратковременных наблюдений над изменением температуры воды в водохранилище по глубине, а также, если они имеются, и другие сведения о температурном режиме воды в водоеме, например, изменение температуры поверхности воды во времени и по площади.

В расчетной части курсового проекта следует выполнить расчет средней температуры воды водоема за весь безледоставный период и изучить характер изменения температуры по глубине водоема в течение одного-двух месяцев. Данные такого рода являются необходимыми как для проектирования водохранилищ, так и при эксплуатации существующих водоемов.

Расчет средней температуры воды водоема за безледоставный период (тема 5)

Эта задача решается либо методом Н. М. Бернадского (метод изоклин), который описан в работах [1, 2], либо методом А. П. Браславского [4], либо методом суперпозиции [3, 5, 6]. Перечисленные методы расчета средней температуры воды водоема заключаются в установлении количественных связей между температурой воды и всем комплексом метеорологических факторов над водоемом. Эти связи математически описываются уравнением теплового баланса.

Для непроточного водоема или водоема с очень малой проточностью уравнение теплового баланса, отнесенное к площади зеркала, равной единице (1 м^2), имеет вид

$$c\rho h_{\text{cp}} \frac{dt_{\text{cp}}}{dt} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5, \quad (1)$$

где Q_1 — потери теплоты при испарении воды; Q_2 — конвективный теплообмен с атмосферой; Q_3 — излучение теплоты поверхностью воды; Q_4 — встречное излучение теплоты атмосферой; Q_5 — приход теплоты за счет прямой и рассеянной солнечной радиации; c , ρ , h_{cp} — соответственно удельная теплоемкость, плотность воды и средняя глубина водоема; $\frac{dt_{\text{cp}}}{dt}$ — изменение температуры воды водоема по времени.

В целях решения уравнения (1) методом изоклин оно преобразуется таким образом, что все слагаемые правой его части делят на две группы: в первую включают слагаемые, зависящие от температуры воды, во вторую — слагаемые, зависящие только от метеорологических условий [2].

Учитывая, что расчету подлежит не температура поверхности воды t_n , через которую определяются тепловые потоки Q_1 , Q_2 , Q_3 , а средняя температура водоема t_{cp} , необходимо выполнить также переход от t_n к t_{cp} . Это можно сделать, исходя из соотношения вида

$$t_n = k t_{cp} \quad (2)$$

Переходный коэффициент k , как показали исследования, для неглубоких водоемов может быть принят равным 1,1 в период нагретия и 0,9 в период охлаждения водоема.

При решении уравнения все расчеты следует вести в системе СИ. Для решения этого уравнения необходимо знать среднюю температуру водоема в начальный момент времени (например, можно принять за начальный момент расчетного периода дату окончательного очищения водоема от льда, а температуру в этот момент равной 0°C) и метеорологические условия над водоемом за расчетный период. Последние в форме среднемесячных величин могут быть заданы в виде прогноза или использованы их среднемесячные характеристики.

Литература

1. Бибиков Д. Н., Петрунчиков Н. Н. Ледовые затруднения на гидроэлектростанциях. — М. — Л.: Гостергиздат, 1950, с. 21 — 35.
2. Вышинков С. Д., Проскураков Б. В. Гидрофизика. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988, с. 129 — 132.
3. Гонимб Я. Л., Жидких В. М., Сокольников Н. М. Тепловой режим водохранилищ гидроэлектростанций. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976, с. 203.
4. Митон В. М. Практическая гидрофизика. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983, с. 33 — 50.
5. Пехович А. И. Основы гидроледотермики. — Л.: Энергоатомиздат, 1983, с. 42 — 72.
6. Рекомендации по термическому расчету водохранилищ. — Л., 1979, П(78-79)/ВНИИГ. — 74 с.
7. Российский К. И. Термический режим водохранилищ. — М.: Наука, 1975. — 168 с.
8. Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983, с. 133 — 163.

Расчет изменения температуры воды в водоеме по глубине (тема б)

Выбирается водоем (озеро, водохранилище), для которого за базисный период года, за который предполагается проводить расчеты, имеются данные наблюдений за температурой воды на различных глубинах в начальный момент времени t_0 .

Так как в водоемах, как правило, наблюдается неустойчивый режим движения теплоты, то в качестве основного расчетного уравнения должно быть использовано уравнение теплопроводности

сти. При достаточно большой площади и глубине водоема температурой можно рассматривать только как функцию глубины z (линейная задача). Наиболее простым и в то же время достаточно точным методом решения уравнения теплопроводности является метод конечных разностей. Этот метод рассматривается в многочисленной литературе по теплофизическим расчетам, в частности, в работах [1, 2, 4].

Для рассматриваемого случая уравнение теплопроводности в конечных разностях записывается следующим образом:

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = a_r \frac{\Delta^2 t}{\Delta z^2}, \quad (1)$$

где Δt — приращение температуры на уровне z за период времени $\Delta \tau$; a_r — коэффициент турбулентной теплопроводности, величина его переменна по глубине z ; $\frac{\Delta^2 t}{\Delta z^2}$ — конечно-разностная аппроксимация второй производной температуры на глубине z в момент времени t_i .

После выполнения некоторых несложных преобразований, которые следует привести в курсовом проекте, решение уравнения теплопроводности (1) принимает простой вид [2]:

$$t_{z_i + \Delta \tau} = \frac{t_i(z + \Delta z)^2 + t_i(z - \Delta z)^2}{2}, \quad (2)$$

где Δz и $\Delta \tau$ — шаг по глубине и по времени.

При решении предлагаемой задачи необходимо, исходя из условия задачи, либо задавать шаг по времени ($\Delta \tau$) и затем определять шаг Δz по глубине, либо, наоборот, задавать шаг по глубине, который предопределяет величину $\Delta \tau$.

Связь между $\Delta \tau$ и Δz устанавливается известным условием Шмидта

$$\frac{2a_r \Delta \tau}{(\Delta z)^2} = 1, \quad (3)$$

где коэффициент турбулентной теплопроводности может быть определен по формуле К.И. Россинского [5, с. 53], либо по

данным наблюдений за температурой воды [2, с. 81], в крайнем случае задано его приближенное значение, опираясь на рекомендации о нем в литературных источниках.

Для решения задачи необходимо знать начальные и граничные условия.

Начальные условия: в начальный момент времени t_0 должна быть известна температура воды на всех расчетных уровнях.

Граничные условия: на весь период расчета температуры воды на верхней границе водной массы должна быть задана температура воды t_n — это граничные условия первого рода, а на нижней границе (дно водоема) тепловой поток q — это условия второго рода [2, с. 73–75].

Таким образом, для каждого расчетного момента времени должно быть каким-либо образом указана температура поверхности воды.

На нижней границе (на дне водоема) необходимо перейти от граничных условий второго рода к граничным условиям первого рода, т. е. температуре, используя соотношение

$$q_{\text{дн}} = -\lambda_r \left. \frac{\Delta t}{\Delta z} \right|_{z=h} = -\lambda_r \frac{t_{h-\Delta z} - t_h}{\Delta z}, \quad (4)$$

откуда

$$t_{z=h} = t_{h-\Delta z} + \frac{q_{\text{дн}}}{\lambda_r} \Delta z, \quad (5)$$

где $q_{\text{дн}}$ — плотность теплового потока через дно водоема (положительное значение $q_{\text{дн}}$ говорит о том, что этот поток направлен от дна водоема к водной массе; отрицательное — поток направлен от водной массы в грунт дна); h — глубина водоема.

Величины $q_{\text{дн}}$ могут быть заимствованы из таблицы 1.16, приведенной в учебном пособии [5, с. 25–26]; а значения коэффициента турбулентной теплопроводности λ_r определены по формуле

$$\lambda_r = cr a_r. \quad (6)$$

Расчет температуры воды по глубине по формуле (2) производится в графической или табличной форме. В табличной форме его осуществить легче.

Рассмотрим небольшой конкретный пример. Пусть водоем глубиной $h = 12$ м находится на широте 60° . Необходимый расчет температуры воды по глубине выполнить для июня месяца.

Имеются данные наблюдений за температурой воды в начальный момент времени t_0 , т. е. $1/IV$ — начальные условия (см. вторую графу табл. 9). Значение коэффициента турбулентной теплопроводности a_r будем считать уже определенным: $a_r = 1,16 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Если назначить расчетный интервал глубины $\Delta z = 1$ м (первая графа таблицы), то по формуле (3) легко установить, что расчетный интервал времени $\Delta \tau = 4,31 \cdot 10^5 \text{ сек} = 120 \text{ ч}$. Если расчетные горизонты не совпадают с горизонтами, в которых велись наблюдения над температурами, то соответствующие значения температуры найдутся путем интерполяции.

Если граничные условия первого рода на поверхности каким-либо образом заданы, например, $1/IV$ $t_n = 30^\circ \text{C}$, $5/IV$ $t_n = 32^\circ \text{C}$, $10/IV$ $t_n = 29^\circ \text{C}$, $15/IV$ $t_n = 26^\circ \text{C}$ и т. д., то закончить расчет температуры в табл. 9 на различных горизонтах по формуле (2) не представляет большого труда (см. расчет температуры за $5/IV$ — графа 3). Расчет же температуры воды на границе с дном $t_{z=h}$ выполняется по формуле (5).

Затем по формуле (2) производится расчет температур для последующих моментов времени (t_2 , t_3 и т. д.). Когда расчет таблицы будет завершен, строятся кривые изменения температуры по глубине для каждого расчетного момента времени.

Следует иметь в виду также, что если граничные условия первого рода не заданы, то для решения задачи могут быть использованы либо граничные условия второго рода, либо граничные условия третьего рода. С переходом от этих двух граничных условий к граничным условиям первого рода можно позакончиться в работе [2, стр. 100–103].

Расчетная таблица температуры воды по глубине

Таблица 9

Глубина $z, \text{ м}$	Дата и расчетный момент времени, ч					
	1/VI	5/VI	10/VI	15/VI	20/VI	25/VI
0	30	32	240	360	480	600
1	24	25	29	26	...	...
2	20	21				
3	18	16				
4	12	14,5				
5	11	11				
6	10	10				
7	9	9				
8	8	8				
9	7	7				
10	6	5,5				
11	4	5				
12	4	$t_{z=h}$				

Литература

1. Бибиков Д. Н., Петрунчиков Н. Н. Ледовые затруднения на гидроэлектростанциях. — М. — Л.: Гидроэнергоиздат, 1950, с. 35 — 42.
2. Винников С. Д., Прохуряков Б. В. Гидрофизика. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988, с. 100 — 103.
3. Гонимб Я. Л., Жидких В. М., Сокольников Н. М. Тепловой режим водохранилищ гидроэлектростанций. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976, 203 с.
4. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. — М.: Энергия, 1977, с. 234 — 236.
5. Мишин В. М. Практическая гидрофизика. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983, с. 33 — 68.
6. Пехович А. И. Основы гидрометеорологии. — Л.: Энергоатомиздат, 1983, с. 42 — 83.
7. Рекомендации по термическому расчету водохранилищ. — Л., 1979, Ц(78-79)/ВНИИГ. — 74 с.
8. Россинский К. И. Термический режим водохранилищ. — М.: Наука, 1975. — 168 с.
9. Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983, с. 133 — 163.
10. Браславский А. П., Кузирина М. Н., Смирнова М. Е. Тепловое влияние объектов энергетики на водную среду. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — 252 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Общие указания	3
Введение	4
Молекулярная физика воды в трех ее агрегатных состояниях	4
Основные физические свойства воды, водяного пара, льда и снега	5
Основные положения теплообмена	6
Стационарное температурное поле	7
Нестационарное температурное поле	7
Гидротермический расчет водоемов и водотоков	8
Ледотехнический расчет водоемов и водотоков	9
Испарение с поверхности воды, снега, льда и почвы	10
Вода в почвогрунтах и снежном покрове	11
Акустические, оптические и электромагнитные явления в воде	12
Методы определения некоторых водотермических и механических констант материалов	13
Контрольная работа	14
Общие указания к выполнению курсового проекта	14
Тема 1. Ветровое волнение на водоеме и методика расчета элементов волн	25
Тема 2. Испарение с водной поверхности водоема по данным наблюдений и расчета	28
Тема 3. Определение шугонпропускающей площади поливны нижнего бьефа ГЭС	29
Тема 4. Зимний термический и ледовый режимы водоема (водотока)	33
Темы 5,6. Термический режим малопроточного водоема (озера, водохранилища) за безледоставный период	37
	40

Учебное издание

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по дисциплине

"ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ, ОКЕАНА И ВОД СУШИ"

Раздел – "Физика вод суши"

Специальность: Гидрология

Составители: Сергей Дорофеевич Винников

Александр Николаевич Постников

Алексей Витальевич Лубяной

Редактор И.Г. Максимова
ДР № 020309 от 30.12.96

Подписано в печать 04.08.2000 г. Формат 60х90 1/16
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 3,0. Уч.-изд. л. 3,7. Тираж 400. Зак. 122
РПТМУ, 195196, СПб, Малоохтинский пр., 98.
Опечатано ООО «Концепт»

Министерство образования Российской Федерации
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет заочного обучения

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

по дисциплине

“ФИЗИКА АТМОСФЕРЫ, ОКЕАНА И ВОД СУШИ”

(Раздел – «Физика вод суши»)

Специальность: Гидрология

Курс III

(Подлежит возврату
на факультет заочного обучения)



Санкт-Петербург
2000