

Г.Г. Круглов  
Ю.А. Медведева

# Гидротехнические сооружения

Лабораторный  
практикум



Для студентов  
учреждений высшего образования

Г.Г. Круглов  
Ю.А. Медведева

# Гидротехнические сооружения

Лабораторный практикум

*Допущено  
Министерством образования  
Республики Беларусь  
в качестве учебного пособия  
для студентов учреждений  
высшего образования по специальностям  
«Водохозяйственное строительство»,  
«Строительство тепловых  
и атомных электростанций»*



Минск  
«Вышэйшая школа»  
2019

УДК 626/627(076.58)  
ББК 38.77я73  
К84

Рецензенты: кафедра «Энергетика» учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (доцент кафедры кандидат технических наук, доцент *А.М. Кравцов*); заведующий группой отдела водопроводов и канализации ОАО «Белгорхимпром» кандидат технических наук, доцент *А.М. Шейко*

**Круглов, Г. Г.**

К84 Гидротехнические сооружения : лабораторный практикум : учебное пособие / Г. Г. Круглов, Ю. А. Медведева. — Минск : Вышэйшая школа, 2019. — 109 с., ил.  
ISBN 978-985-06-3045-2.

Изложены теоретические сведения, представлены основные требования при выполнении лабораторных работ, методика их проведения, даны указания по обработке и оформлению экспериментальных данных. Тематика лабораторных работ охватывает изучение конструкций и методов гидравлических, фильтрационных и статических расчетов подпорных и водосбросных гидротехнических сооружений.

Для студентов учреждений высшего образования по специальностям «Водохозяйственное строительство», «Строительство тепловых и атомных электростанций».

**УДК 626/627(076.58)**  
**ББК 38.77я73**

*Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части не может быть осуществлено без разрешения издательства.*

**ISBN 978-985-06-3045-2**

© Круглов Г.Г., Медведева Ю.А., 2019  
© Оформление. УП «Издательство  
“Вышэйшая школа”», 2019

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Практикум включает в себя 13 лабораторных работ по основным разделам дисциплин «Гидротехнические сооружения» и «Гидротехнические сооружения и ГЭС» для студентов специальности «Водохозяйственное строительство» (специализации «Гидротехническое строительство» и «Водные пути и порты»), а также специальности «Строительство тепловых и атомных электростанций».

Гидротехнические сооружения – это инженерные сооружения, которые предназначены для использования водных ресурсов в хозяйственных целях или для борьбы с вредным воздействием водной стихии. Основной целью дисциплины «Гидротехнические сооружения» является получение студентами необходимых знаний для проектирования и строительства гидротехнических сооружений.

При решении основных задач, связанных с проектированием гидротехнических сооружений, гидроузлов, используются различные методы исследования – теоретический, экспериментальный (лабораторный, натурный), метод аналогии вариантного проектирования и др.

Лабораторные исследования обычно проводят в двух направлениях:

- в ходе специальных опытов (проверяют те или иные положения теории или на основе серии опытов строят теорию);
- на основе лабораторного моделирования сооружений и конструкций (замеряют искомые величины – скорости течения, деформации, давления и т.п.).

Лабораторные занятия дают ценные результаты и позволяют не только надежно обосновать проект конкретного сооружения, но и развить теорию, содействуя, таким образом, прогрессу гидротехнического строительства.

Основной задачей лабораторных работ является ознакомление студентов с конструкциями и методами гидравлических, фильтрационных и статических расчетов подпорных и водосбросных гидротехнических сооружений, с методикой их лабораторных исследований и обработки экспериментальных данных.

Практикум призван улучшить подготовку студентов на базе расширения объемов самостоятельной работы по изучению соответствующих дисциплин, привить навыки творческой работы в области исследований гидротехнических сооружений.

Последовательность выполнения лабораторных работ полностью соответствует материалу, изучаемому студентами на лекционных занятиях.

## **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ**

При выполнении лабораторных работ, которые проводятся в специально оснащенной уникальной лаборатории гидротехнических сооружений, необходимо соблюдать требования инструкций по охране труда и пожарной безопасности. На первом занятии каждый студент обязан ознакомиться с основными инструкциями: «Инструкцией по охране труда для студентов и слушателей университета, профессорско-преподавательского состава», «Инструкцией о мерах пожарной безопасности в административных зданиях и помещениях», «Инструкцией по оказанию первой медицинской помощи при поражениях электрическим током и других опасных случаях». После этого необходимо зарегистрироваться в журнале регистрации инструктажа. Также студенты должны знать и соблюдать правила внутреннего распорядка университета.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

---

---

## Исследование фильтрации через однородную земляную плотину с дренажной призмой, расположенную на водоупоре

**Цель работы:** построить кривую депрессии в теле плотины по опытным данным и сравнить ее с вычисленной по аналитическим зависимостям; определить опытным путем фильтрационный расход через тело плотины и сравнить его с вычисленным значением.

### *Теоретическая часть*

Инженерные сооружения, предназначенные для использования водных ресурсов в хозяйственных целях, называются **гидротехническими**. Они характеризуются большим разнообразием конструкций, что обусловливается их многоцелевым назначением и многообразием природных условий, в которых они возводятся. Все многочисленные типы гидротехнических сооружений можно классифицировать по следующим наиболее общим факторам.

В зависимости от водного объекта, на котором возводятся гидротехнические сооружения, они подразделяются на **речные**, **озерные** и **морские**, а в зависимости от их местоположения относительно поверхности земли – на **наземные** и **подземные**. В данном курсе будут рассматриваться речные гидротехнические сооружения.

Гидротехнические сооружения, которые используются одновременно несколькими отраслями водного хозяйства, называются **общими**, а сооружения, предназначенные для использования только одной какой-либо отрасли, – **специальными**. К общим гидротехническим сооружениям относятся, например, плотины, водосбросные сооружения, каналы, а к специальным – здания гидроэлектростанций, судоходные шлюзы, портовые сооружения др.

В зависимости от характера воздействия на речной поток гидротехнические сооружения подразделяются на водоподпорные, водопроводящие и руслорегулирующие.

**Водоподпорными** называются сооружения, перегораживающие русло реки и создающие подпор, т.е. разность уровней воды перед и за сооружениями. Основными водоподпорными сооружениями являются плотины различных конструкций, возводимые из различных материалов.

Зона потока выше по течению реки называется верхним (или подпертым) бьефом (ВБ), а ниже – нижним бьефом (НБ). Разность уровней воды в верхнем и нижнем бьефах называется **напором** ( $H$ ) на сооружение. Подпор уровня воды в верхнем бьефе распространяется вверх по течению реки, постепенно уменьшаясь, а уровни воды приближаются к бытовым ( $h_0$ ), т.е. тем уровням, которые были до строительства подпорного сооружения. Глубина речного потока увеличивается по мере приближения к плотине, а скорость потока при этом уменьшается.

Вследствие повышения уровней воды в ВБ происходит затопление прибрежных территорий, которые ранее не затоплялись или затоплялись кратковременно во время паводков и половодий.

Под действием напора, созданного плотиной, осуществляется движение воды из верхнего бьефа в нижний через поры грунта основания. Это явление называется **фильтрацией** воды в основании сооружения. Помимо фильтрации в основании сооружения созданный напор вызывает и фильтрацию воды в берегах, к которым примыкает подпорное сооружение, так называемую обходную фильтрацию, т.е. фильтрацию в обход подпорного сооружения.

**Водопроводящие сооружения** представляют собой искусственные русла, предназначенные для подачи воды от водоисточника к водопотребителю (водопользователю). К водопроводящим сооружениям относятся *каналы, гидротехнические туннели, лотки и трубопроводы*.

**Руслорегулирующие сооружения** не создают разности уровней воды в реке, они предназначены для регулирования потока в русле и на пойме, эрозионных процессов в русле, а также для изменения режима потока с целью наиболее эффективного его использования в хозяйственной деятельности или для защиты берега от разрушающего воздействия.

Руслорегулирующие сооружения представляют собой дамбы или струенаправляющие сооружения, возводимые в русле реки с целью изменения режима движения речного потока для максимально эффективного использования потребителями. К регуляционным сооружениям относятся также береговые одежды, защищающие берег от размыва речным потоком.

Все постоянные гидротехнические сооружения в зависимости от их высоты и типа грунтов основания, социально-экономической ответственности и последствий возможных аварий подразделяют на классы: *I, II, III и IV*.

**Классификация плотин из грунтовых материалов.** По материалам, которые используются для возведения тела плотины, различают плотины:

- **земляные** – из одного или нескольких маловодопроницаемых мелкозернистых грунтов;
- **каменно-земляные** – часть тела плотины из мелкозернистых грунтов, часть – из крупнообломочных;



- **каменные** — из крупнообломочных грунтов с водонепроницаемыми устройствами из негрунтовых материалов.

По способу возведения грунтовые плотины подразделяются:

- на **насыпные** — возводимые послойной отсыпкой грунтов насухо с последующим механическим уплотнением или путем отсыпки грунта в воду;

- **намывные** — возводимые средствами гидромеханизации, когда разработка грунта в карьере, его транспортировка и укладка в тело плотины осуществляются с помощью воды;

- **полунамывные** — возводимые частично отсыпкой грунта насухо, частично методом гидромеханизации;

- **взрывонабросные** — возводимые направленным взрывом.

По высоте грунтовые плотины делятся:

- на **низкие** — напор менее 15 м;

- **средние** — 15...50 м;

- **высокие** — более 50 м.

По условиям пропуска строительных и эксплуатационных расходов воды различают плотины:

- **глухие** — перелив воды через их гребень не допускается, а фильтрационный расход через тело плотины мал по сравнению со строительными или эксплуатационными расходами;

- **фильтрующие** — фильтрационный расход через тело плотины соизмерим со сбросными расходами;

- **переливные** — допускающие перелив воды через гребень и низовой откос плотины, которые соответствующим образом закрепляются;

- **с размываемой вставкой** — обеспечивающие пропуск расчетных паводковых вод через частично размываемый участок плотины.

Земляные плотины по конструктивному признаку подразделяются на **однородные** (без противофильтрационных элементов) и **неоднородные** (с противофильтрационными элементами). В зависимости от местоположения противофильтрационных элементов различают плотины с **центральной ядром** (рис. 1.1, а), когда ось ядра совпадает с осью плотины, с **наклонным ядром** (рис. 1.1, б) и с **экраном**, располагающимся непосредственно у верхового откоса плотины (рис. 1.1, в).

При возведении плотины на водопроницаемом грунте большой мощности ( $T > 20$  м) могут устраиваться плотины с **экраном и понуром** (рис. 1.1, г).

В качестве негрунтовых противофильтрационных устройств могут применяться экраны и диафрагмы, однако в земляных плотинах они используются редко, за исключением экранов из полимерных пленок, которые в настоящее время достаточно широко распространены.



Фильтрационные расчеты земляных плотин выполняются с целью определения положения депрессионной кривой, установления градиентов и скоростей фильтрационного потока и вычисления фильтрационного расхода. Результаты фильтрационных расчетов используются для проверки устойчивости откосов плотины, для определения фильтрационной прочности грунта тела плотины и основания, а также для обоснования принятых размеров поперечного профиля плотины, противофильтрационных и дренажных устройств. Кроме того, эти расчеты позволяют определить потери воды из водохранилища на фильтрацию, что необходимо при проведении водохозяйственных расчетов водохранилищ.

Для выполнения фильтрационных расчетов разработаны экспериментальные и аналитические методы.

К **экспериментальным** относятся метод электрогидродинамических аналогий (ЭГДА), разработанный академиком Н.Н. Павловским, методы «грунтовой лоток» и «шелевой лоток». Наиболее распространенным экспериментальным методом является метод ЭГДА, а наиболее точно описывающим реальную картину движения фильтрационного потока через тело плотины – метод «грунтовой лоток», который используется во всех лабораторных работах по исследованию фильтрации.

**Аналитические методы** делятся на две группы: гидромеханические методы и гидравлические методы.

**Гидромеханические методы** расчета основаны на решении уравнения Лапласа при заданных граничных условиях. Пользуясь этими методами, можно определить все параметры фильтрационного потока в любой точке области фильтрации. Они дают наиболее точные результаты, но сложны и неудобны в использовании и разработаны только для наиболее простых расчетных схем. В связи с этим их практическое применение ограничено.

Наибольшее распространение в проектной практике получили **гидравлические методы** расчета. Эти методы хотя и менее точны, чем гидромеханические, но значительно проще и дают решения для самых разнообразных расчетных схем. Они основаны на законе Дарси с применением формул Дюпюи.

При выводе расчетных зависимостей приняты следующие упрощения и допущения:

- рассматривается движение грунтовых вод в одной плоскости (плоская задача); скорости, перпендикулярные этой плоскости, принимаются равными нулю;
- грунт тела плотины считается однородным изотропным, т.е. коэффициент фильтрации в любой точке области фильтрации постоянен по всем направлениям;

- потери напора в креплении верхового откоса не учитываются;
- при наличии водоупора в основании плотины он считается теоретически водонепроницаемым.

Расчет фильтрации (рис. 1.2) ведется по формуле Дюпюи

$$\frac{q}{k_T} = \frac{h_1^2 - h_2^2}{2L_p}, \quad (1.1)$$

где  $q$  – удельный расход фильтрации, см<sup>3</sup>/с на погонной длине 1 см;  $k_T$  – коэффициент фильтрации грунта тела плотины, см/с;  $h_1$  – глубина воды в верхнем бьефе, см;  $h_2$  – глубина воды в нижнем бьефе, см.

Расчетная длина фильтрационного пути

$$L_p = \Delta L_B + L + \Delta L_H, \quad (1.2)$$

где  $L$  – расстояние от оси ординат до верховой бровки дренажной призмы;

$$\Delta L_B = \frac{m_1}{2m_1 + 1} h_1, \quad (1.3)$$

$$\Delta L_H = \frac{m'_1}{3} h_2, \quad (1.4)$$

где  $m_1$  – коэффициент заложения верхового откоса плотины;  $m'_1$  – коэффициент заложения верхового откоса дренажной призмы.

Ординаты кривой депрессии определяются по формуле

$$h_x = \sqrt{2 \frac{q}{k_T} (L - x) + h_c^2}, \quad (1.5)$$

где  $h_x$  и  $x$  – текущие координаты кривой депрессии.

Ординаты кривой депрессии в вертикальном сечении, проходящей через бровку верхового откоса дренажной призмы, можно найти из уравнения

$$h_c = \sqrt{h_1^2 - 2 \frac{q}{k_T} (L + \Delta L_B)}. \quad (1.6)$$

# СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	3
Общие требования при выполнении работ.....	4
<i>Лабораторная работа № 1.</i> Исследование фильтрации через однородную земляную плотину с дренажной призмой, расположенную на водоупоре. . . .	5
<i>Лабораторная работа № 2.</i> Исследование фильтрации через земляную плотину с ядром, расположенную на водоупоре .....	15
<i>Лабораторная работа № 3.</i> Исследование фильтрации через земляную плотину с экраном, расположенную на водоупоре .....	20
<i>Лабораторная работа № 4.</i> Исследование фильтрации через земляную плотину с экраном и понуром, расположенную на проницаемом основании конечной мощности .....	26
<i>Лабораторная работа № 5.</i> Исследование гидравлических режимов в прямоугольной трубе .....	32
<i>Лабораторная работа № 6.</i> Гидравлические исследования шахтного водосброса .....	39
<i>Лабораторная работа № 7.</i> Гидравлические исследования неподтопленного безвакуумного водослива практического профиля .....	45
<i>Лабораторная работа № 8.</i> Гидравлические исследования неподтопленного вакуумного водослива практического профиля .....	53
<i>Лабораторная работа № 9.</i> Исследование гасителей кинетической энергии потока за водосливной плотиной практического профиля . . . .	59
<i>Лабораторная работа № 10.</i> Гидравлические исследования режима работы сифонного водосброса при истечении в атмосферу и под уровень . . .	66
<i>Лабораторная работа № 11.</i> Исследование напорной фильтрации под плотиной, расположенной на песчаном грунте основания .....	73
<i>Лабораторная работа № 12.</i> Исследование фильтрации в обход берегового устоя .....	81

<i>Лабораторная работа № 13. Проверка устойчивости водоподпорной плотины на сдвиг и всплытие</i> .....	87
Приложения .....	93
Литература .....	107

Учебное издание

**Круглов** Георгий Георгиевич  
**Медведева** Юлия Александровна

## **ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

**Лабораторный практикум**

Учебное пособие

Редактор *Е.В. Савицкая*  
Художественный редактор *Т.В. Шабунько*  
Технический редактор *Н.А. Лебедевич*  
Корректор *Е.В. Савицкая*  
Компьютерная верстка *Н.В. Шабуня*

Подписано в печать 18.02.2019. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «NewtonC». Офсетная печать. Усл. печ. л. 6,51. Уч.-изд. л. 6,6. Тираж 400 экз. Заказ 211.

Республиканское унитарное предприятие «Издательство “Вышэйшая школа”».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/3 от 08.07.2013.

Пр. Победителей, 11, 220004, Минск.  
e-mail: market@vshph.com <http://vshph.com>

Республиканское унитарное предприятие «СтройМедиаПроект».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 2/42 от 13.02.2014.

Ул. В. Хоружей, 13/61, 220123, Минск.