

**Л.Н. РАССКАЗОВ, В.Г. ОРЕХОВ, Н.А. АНИСКИН, В.В. МАЛАХАНОВ,  
А.С. БЕСТУЖЕВА, М.П. САИНОВ, П.В. СОЛДАТОВ, В.В. ТОЛСТИКОВ**

# **ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

**ЧАСТЬ 1**

**Л.Н. РАССКАЗОВ, В.Г. ОРЕХОВ, Н.А. АНИСКИН, В.В. МАЛАХАНОВ,  
А.С. БЕСТУЖЕВА, М.П. САИНОВ, П.В. СОЛДАТОВ, В.В. ТОЛСТИКОВ**

# **ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

**ЧАСТЬ 1**

Л.Н. РАССКАЗОВ, В.Г. ОРЕХОВ, Н.А. АНИСКИН, В.В. МАЛАХАНОВ,  
А.С. БЕСТУЖЕВА, М.П. САИНОВ, П.В. СОЛДАТОВ, В.В. ТОЛСТИКОВ

# ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

В двух частях  
**ЧАСТЬ 1**

**Издание второе,**  
исправленное и дополненное  
под редакцией Заслуженного деятеля науки Российской Федерации,  
действительного члена Академии проблем водохозяйственных наук,  
д-ра техн. наук, профессора **Л.Н. Рассказова**

*Допущено Министерством образования Российской Федерации в качестве учебника  
для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению  
«Строительство» специальности «Гидротехническое строительство»*



Издательство Ассоциации строительных вузов  
Москва 2011

**Рецензенты:**

Кафедра Гидротехническое строительство СПбГПУ  
(зав. кафедрой, д.т.н., профессор *А.И. Альхименко*);

**д.т.н., профессор *А.Л. Гольдин***

(Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б.Е. Веденеева)

**Рассказов Л.Н., Орехов В.Г., Анискин Н.А., Малаханов В.В., Бестужева А.С., Саинов М.П., Солдатов П.В., Толстиков В.В.** Гидротехнические сооружения. Часть 1. Учебник для вузов. Издание второе, исправленное и дополненное. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2011. – 576 с.

**ISBN 978-5-93093-593-6**

Учебник «Гидротехнические сооружения» охватывает очень большой комплекс вопросов: от исторического очерка развития гидротехнического строительства до ремонта сооружений, от фильтрации под и в обход гидротехнических сооружений (ГС) до оптимизации конструкции ГС и движения возможных трещин в теле и в основании плотин, от конструкции плотин, их статического расчета и учета сейсмических воздействий до экологических проблем строительства ГС.

Многие расчёты сооружений даны в пространственной постановке.

Учебник включает большое количество исследований, выполненных за последние 12–14 лет. Он предназначен для студентов и аспирантов, обучающихся по специальности «Гидротехническое строительство», и инженеров работающих в этой области.

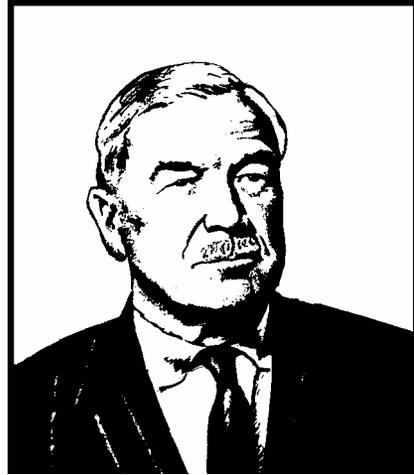
**ISBN 978-5-93093-593-6**

© Издательство АСВ, 2011

© Рассказов Л.Н. и др., 2011

## ПРЕДИСЛОВИЕ

**ГРИШИН** Михаил Михайлович (1891 – 1979) – основоположник гидротехнической школы, Заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор, д-р техн. наук, создатель основного учебника по гидротехническим сооружениям, который им совершенствовался и по которому изучали гидротехнические сооружения многие тысячи советских инженеров. Он вел изыскания еще в 1918 году по трассе Волго-Донского судоходного канала. Был главным инженером проекта одного из вариантов Куйбышевского гидроузла (в конце 30-х годов) на стадии выбора створа (в районе Красной Глинки) и компоновки гидроузла. Являлся председателем технического совета института «Гидропроект», на который до 1952 г. были возложены обязанности рассматривать и утверждать проекты всех строящихся гидротехнических объектов. Им был создан гидротехнический сектор во ВНИИ «ВОДГЕО» (1931 г.). В послевоенные годы М.М. Гришин вел исследовательскую работу по восстановлению разрушенных во время войны гидротехнических сооружений. Затем был заместителем начальника и главного инженера Гидропроекта. Был создателем и научным руководителем проблемной научно-исследовательской лаборатории в МИСИ. Большое внимание М.М. Гришин уделял методике проектирования и моделирования гидротехнических сооружений – им был предложен метод эскизного проектирования. В 1957 г. М.М. Гришин был избран действительным членом (академиком) Академии строительства и архитектуры СССР



Коллектив авторов, готовивший этот учебник к изданию, для повышения уровня и качества подготовки специалистов в области проектирования гидротехнических сооружений и строительства стремился учесть успехи, достигнутые в науке и технике в последние годы. Особое внимание в учебнике уделено ранее не рассматриваемым или рассматриваемым кратко вопросам: общим принципам проектирования, применению механики разрушения к расчету прочности плотин и их элементов, оптимизации конструкций гидротехнических сооружений и т.д. Получили дальнейшее развитие вопросы сейсмостойкости гидротехнических сооружений за счет включения динамических приемов расчета. Учебник знакомит читателей с использованием вероятностных подходов учета ползучести грунтов в расчетах прочности и устойчивости грунтовых плотин, что имеет большое значение для построения мониторинга в период эксплуатации сооружений и оценки их надежности.

Достаточно подробно изложены вопросы технической эксплуатации сооружений и как лабораторных, так и натуральных исследований.

Авторы старались построить учебник таким образом, чтобы замена нормативов вследствие их устаревания или реформирования системы проектирования и строительства не усложняла восприятие изложенного материала.

Авторы сохранили преемственность в методике и порядке изложения материала, накопленную в прежних изданиях этого учебника. В нем использованы

данные прошлых изданий, собранные и систематизированные преподавателями и сотрудниками кафедры гидротехнических сооружений. Большую работу по выбору состава глав и их последовательности еще в 1987 году проделал доктор технических наук, профессор С.М. Слиский.

Учебник рассчитан на подготовку не только высококвалифицированных бакалавров, инженеров и магистров наук, но и аспирантов. Коллектив авторов на основе прежнего опыта полагает, что эта работа (как справочная) будет полезна инженерам-проектировщикам и строителям, так как этот учебник содержит много материала, не изучавшегося ими в период обучения в вузе.

Учебник написан авторским коллективом в составе: Заслуженный деятель науки РФ, действительный член академии проблем водохозяйственных наук, проф., д.т.н. **Л.Н. Рассказов**, под научным руководством которого и написан этот учебник (гл. 1, 3, 7 (в п. 7.7 и 7.8. использованы материалы проф., д.т.н. С.М. Слиского), гл. 11, 12, 13 (п. 13.7 написан совместно с проф., к.т.н. **В.В. Малахановым**), гл. 17, 19, и п. 24.4); действительный член академии проблем водохозяйственных наук проф., д.т.н. **В.Г. Орехов** (гл. 6, 8, 9, 10, 18); проф., д.т.н. **Н.А. Анискин** (гл. 15, 16, пп. 23.3, 23.4 и 23.5); проф., к.т.н. **В.В. Малаханов** (гл. 2, 4, 5, 26, 27, 30–33, п. 13.7 написан совместно с проф., д.т.н. **Л.Н. Рассказовым**, п. 23.6); доц., к.т.н. **А.С. Бестужева** (гл. 25 и 29), доц., к.т.н. **П.В. Солдатов** (гл. 14, 20, 21 и 22), доц., к.т.н. **В.В. Толстик** (гл. 28, п. 24.1 и п. 24.4), доц., к.т.н. **М.П. Саинов** (пп. 23.1, 23.2, 24.2, 24.3).

В работе по подготовке учебника к печати большое участие принимал доц., к.т.н. Саинов М.П., за что ему огромная благодарность от авторов.

Авторы также признательны за подготовку рукописи к печати сотрудникам кафедры – инженерам Т.В. Сусариной и И.Л. Овчинниковой.

Авторы выражают благодарность проф., д.т.н. А.И. Альхименко и сотрудникам кафедры гидротехнических сооружений С.-ПбГПУ, а также проф., д.т.н. А.Г. Гольдину за ценные советы и замечания, сделанные ими при рецензировании рукописи.

# Раздел первый. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ. УСЛОВИЯ РАБОТЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ И ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

## ГЛАВА 1. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

### 1.1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ГИДРОТЕХНИКЕ И ГИДРОТЕХНИКАХ

С момента перехода к оседлому образу жизни человек стал строить гидротехнические сооружения, так как земледелие в районах Средиземноморья, Китая, Индии, Египта, Месопотамии [213] и других регионах земного шара было невозможно без трансформации стока рек по временам года. Греческое название «Месопотамия» – обширная территория от гор Армении до Персидского залива с Запада на Восток и от гор Ирана до Сирийско-Месопотамской степи (Двуречье Тигра и Евфрата – реки берут начало на Армянском нагорье и впадают в Персидский залив).

Развитие таких наук, как астрономия, математика, физика, способствовало совершенствованию гидротехнических сооружений. Людей, занимающихся строительством и гидростроительством, обычно называют инженерами [137]. Это слово, по некоторым данным, происходит от латинского слова *ingenium*, что означает «талант», «мысль», «умение». В русский язык оно пришло от французского *ingenieur* и в современном понимании означает «специалист с высшим образованием в какой-либо области техники». В конце средних веков и в начале эпохи Возрождения инженерами называли специалистов по фортификации, а строителей и гидростроителей называли архитекторами. Постепенно инженерами стали называть вообще строителей, в конце XIX – начале XX в. понятие расширилось до современного значения. Но до сих пор, если кого-либо называют инженером без указания области техники, то имеют в виду строителя.

В середине III тысячелетия до н. э. Китай был высоко цивилизованным государством, в котором было широко развито гидротехническое строительство. Из этого периода пришла легенда, а, скорее всего, быль, об инженере-гидростроителе – великом Юе. Люди селились вдоль рек и испытывали много бед от наводнений. Инженер Юй, живший в XXIII в. до н. э. при императоре Яо, предложил проекты регулирования рек. Им были разработаны методы очистки и углубления русла рек, прокладки каналов. На осуществление этого проекта, который привел страну к расцвету, потребовалось 8 лет. Юй стал известен во всем государстве, а после смерти императора Яо был избран императором. Постепенно память о Юе превратилась в культ: по берегам рек и каналов ставили многочисленные храмы, посвященные великому Юю – Патрону гидростроительства.

Орошаемое земледелие в Китае также достигало огромных масштабов. Так, благодаря инженерам Ли Пину и Ли Эрлангу (отец и сын) была создана система орошения с использованием черпальных колес, превратившая 50 тыс. кв. км пустынной территории Сычуана в урожайные поля. Даже во времена монгольского владычества в Китае было осуществлено соединение бассейнов рек Хуанхэ и Янцзы (конец XIII в.). Проект Великого императорского канала разработал Кио Чо. Сведения о строительстве этого канала длиной 1000 км (без учета ответвлений) исходят от венецианского путешественника Марко Поло. Канал, соединивший города Пекин и Ханчжоу, служит людям и сейчас. По китайским данным он был построен в VI в.

Освоение Северной Месопотамии началось в VI тысячелетии до н.э. Уже в V и IV тыс. до н.э. была создана система каналов [137] в Южной Месопотамии, а затем и в средней части двуречья. Крупные здания в Месопотамии имели канализацию и дренажные системы. В домах были ваннные комнаты (впоследствии так же были устроены дома в Греции (VI в. до н.э.)). Первые труды по агрономии появились за три тысячи лет до н.э. В Месопотамии ввели часы, минуты, секунды, деление окружности на 360°.

В 19 веке до н.э. появился город Вавилон (Баб-Или – «Врата Бога»), который Геродот называл самым красивым городом на Земле (современный Ирак, где реки Тигр и Евфрат сближаются больше всего). В строительстве и эксплуатации оросительных систем участвовали все жители. Уклонение от работ каралось смертной казнью или продажей в рабство. Руководителем строительства являлся царь. Законы царя Хаммумара в виде 282 статей были записаны на столбе из черного базальта, который в настоящее время хранится в Лувре. Упоминание о Вавилоне есть в Библии. С ним связан библейский рассказ (легенда) о царе Вавилона Валтасаре («Пир Валтасара»). В IV–III вв до н.э. грек Берос написал историю Вавилона в 3-х томах.

Начиная с XVIII в. до н.э. в Вавилоне уже готовили строителей гидротехнических сооружений. Решались задачи о плотинах, колодцах, водяных мельницах.

Год в Вавилоне был равен 365 дням, 5 часам 41 минутам и 4,16 секундам, то есть ошибка составляла 7 минут и 17 секунд. В это время были открыты планеты Венера и Юпитер. Было установлено, что каждые 2 тысячи лет меняется эра. Сейчас наступила эра Водолея.

Индусская цивилизация одна из самых древних в мире. В VI тыс. до н.э. население занималось земледелием (слово «пища» в Индии означало «отварной рис»). В IV тыс. до н.э. применялось орошение. В V веке до н.э. выплавлялась сталь. В древней Индии развивались такие науки, как астрономия, математика (были составлены таблицы синусов, цифры десятичной системы пришли к нам из Древней Индии), индусы знали о шарообразности Земли. Уже в древние времена в Индии строительство фундаментов осуществлялось с помощью опускных колодцев, а в Европе лишь в XIX в. н.э. Водоснабжение, канализация, ваннные комнаты в Индии появились, по-видимому, раньше, чем в Вавилоне, уже в IV–III вв. до н.э. здесь строились каналы, дамбы, пруды, колодцы, дороги.



*АРХИМЕД* (287–212 гг. до н.э.) знал о вращении Земли, взаимном притяжении масс, причину волнений и приливов и отливов (от фаз Луны), он вплотную подошел к дифференциальному и интегральному исчислению. Луи Лагранж писал: «За Архимедом сохранилась репутация одного из самых удивительных гениев, которые когда-либо посвящали себя математике. Ни один из геометров древности не сделал таких многочисленных и важных открытий». Архимед установил, что поверхность всякой жидкости, установившейся неподвижно, будет иметь форму шара, центр которого совпадает с центром Земли. Тело, более легкое, чем жидкость, будучи опущено в эту жидкость, не погружается целиком, некоторая часть его остается над поверхностью жидкости. Тело, более легкое, чем

опущенное в эту жидкость насильственно, будет выталкиваться вверх с силой, равной весу, на который жидкость, имеющая равный объем с телом, будет тяжелее этого тела. Архимед установил понятие «удельного веса», число  $3\frac{10}{71} < \pi < 3\frac{10}{70}$  и многое другое (оптика, преломление света, вогнутые зеркала, шнек)

В Египте считали, что мужчина, создающий семью обязан построить дом, посадить сад и выкопать пруд. Элементы индийского гидротехнического строительного искусства использовались в этой стране. В Древнем Египте строились плотины. Остатки одной из них, высотой 14 м обнаружены в 24 км к югу от Каира (две стены из бутовой кладки шириной по основанию 37 м и по верху 29 м и ядро между ними из смеси камня, гравия и супеси. Ширина ядра по основанию 32 метра. Откосы из известняковых глыб 0,3×0,45×0,8 м.).

А плотина высотой 3,25 м для защиты от нильских паводков была построена 4500 тыс. лет назад и существует в настоящее время. Плотины высотой до 25 м строились повсеместно. В Египте существовал канал из Средиземного моря в Красное через один из рукавов в дельте.

Египет оставался наиболее просвещенной страной Средиземноморья до V века н.э!

Пифагор в 23 года добился возможности учиться в Египте. И эта учеба длилась по разным причинам 42 года.

Огромное гидротехническое строительство имело место и в Урарту, и в Персии и в других странах Восточного Средиземноморья.

Великая греческая цивилизация не могла не дать миру и великих гидростроителей. Первым из них можно считать Эвпалиния, который жил в VI в. до н. э. и строил порты, храмы, туннели. Он был первым строителем, которого называли архитектором. Эвпалиний создал проект и осуществил строительство гидротехнического туннеля квадратного сечения через гору Кастра (о. Самос) длиной 1000 м и высотой 1,75 м. В туннеле был проложен трубопровод.

Греция дала миру великого Архимеда, который при вселенской широте своих знаний занимался и гидростатикой – разделом современной гидравлики, являющимся одним из столпов гидротехники.

Интереснейшим и совершенным на Востоке был Марибский гидроузел на территории современной Йеменской республики. Исследования остатков этого гидроузла провели В.Г. Ганчиков и З.И. Мунавваров [36]. Гидроузел был сооружен в VII в. до н. э. и просуществовал, служа людям, до VI в. н. э., т. е. 1300 лет.

Гидроузел (рис. 1.1) состоял из земляной плотины высотой до 18 м и длиной по гребню 750 м, по бортам вади (долины с временным водотоком) были размещены два ирригационных водовыпуска – северный и южный. Вода из водовыпуска поступала в левобережный (с расходом до 30 м<sup>3</sup>/с) и правобережный (до 15 м<sup>3</sup>/с) магистральные каналы. К северному (левобережному) ирригационному водовыпуску примыкал катастрофический водосброс автоматического действия. Но использовалась даже сбросная вода. Она направлялась в соседнюю долину, где орошала засеянную землю, что позволяло получать дополнительный урожай. Кроме водосброса автоматического действия, на обоих водовыпусках имелись водосбросные отверстия, сброс через которые регулировался каменными балками – шандорами. Гидроузел орошал 10 тыс. га земли. Участок земляной плотины сохранился у северного (левобережного) водосброса (рис. 1.1). Плотина выполнена из супесчаного (по внешнему виду) материала с креплением верхового откоса каменной мостовой. На переднем плане (см. рис. 1.1) хорошо видны каменный южный (правобережный) устой и водосброс; вдали – профиль плотины и за ним северный водосброс.

Поражает глубина знаний древних инженеров в области гидравлики, гидрологии и грунтовых сооружений. Первыми инженерами этого гидроузла были отец и сын Али Януф и Ата Амр. Они точно оценили расчетные расходы воды и правильно рассчитали пропускную способность водосбросов, заложение откосов в условиях 9-балльной сейсмичности (что и обусловило надежность сооружений гидроузла), а также ирригационные системы. Ведь еще не было формулы Шези, не существовало методов расчетов каналов и водосливов, устойчивости откосов. Не существовало и теории вероятности, которая используется в настоящее время для гидрологических прогнозов. Все это заменялось колоссальным опытом (который передавался из поколения поколение, накапливался, множился) и природным умом, смекалкой.

По мере эксплуатации гидроузла наносы заилили водохранилище (см. рис. 1.2). Время от времени сооружения наращивались. Такая реконструкция, видимо, проводилась в два этапа, в I в. до н. э., а затем в 450 г. и 557 г. н. э. Великий памятник древней цивилизации сохранился в таком хорошем состоянии, что авторы, его обследовавшие, предлагают его восстановить (это несмотря на то что в 3 км выше по течению в 1986 г. построена новая Марибская плотина высотой 40 м в составе гидроузла). Этот гидроузел имел столь большое значение для народов, что он упоминается в Коране.

Эпоха Возрождения дала существенный толчок к развитию гидротехники. Первый камерный шлюз был построен на канале в Милане в 1438 г. Его авторами были Филиппо и Фиораванти (из Болоньи), хотя имеются данные, что ранее такие сооружения строились в Нидерландах. XV в. дал миру и Бертола да Новате, который стал применять в каналах камерные шлюзы для преодоления больших напоров. Его канал между Миланом и Павией (протяженность 30 км) со множеством шлюзов для преодоления разницы бьефов до 25 м существует и поныне (шлюзы перестроены). Строил он и другие каналы и плотины, дамбы и акведуки.

Самым великим представителем XV в. был Леонардо да Винчи. Среди его бесчисленных интересов была и гидротехника: он строил каналы (канал Амбубаз – Франция). Его главное достижение в гидротехнике – внедрение затворов шлюзов на петлях, т. е. изобретение шлюзовых ворот.

Одним из величайших умов человечества Николай Коперник, создавший гелиоцентрическую систему мира. Его труд «О вращении небесных сфер» был выпущен в год его смерти в 1543 г. (возможно, он специально так подгадал с изданием). Книга была немедленно запрещена католической церковью (запрет сохранялся до 20-х годов XIX в.). Однако Николай Коперник прославился не только как астроном, но и как инженер-гидротехник.

Город Фромборк, где жил и умер Николай Коперник, расположен в Прибалтийской части Польши. Близ города (в 2-х км) протекала река Бауды. Пользоваться водой этой реки жители города не могли из-за её отдаленности и вследствие маловодности в меженный период вплоть до пересыхания. Для снабжения города водой Коперник построил в 2-х км выше города водозаборный узел: водосливная плотина и регулирующие устройства, с помощью которых вода отводилась из созданного плотиной водохранилища в прорытый канал, который подводил воду к подножию городского холма. Здесь вода крутила колеса мукомольной мельницы, проходила под водоподъёмной башней высотой 28 м, далее крутила колёса ещё ряда мельниц, обслуживала дубильное производство, и далее канал отдавал излишки воды в Балтийское море. Общая длина водоотводящего канала, получившего в дальнейшем название «Коперниковского», составляла 4 км. Канал просуществовал 200 лет. Коперник осуществил комплексное использование малой реки.

Особый интерес представляет сконструированный Коперником водозаборный механизм, размещенный в башне, для подъема воды на высоту 25 м (на командные для города отметки). Этот механизм представлял из себя ряд ковшей, насаженных на цепь, которая обвивалась вокруг *призматических* валов, укрепленных вверх и вниз башни, – устройство сходное с многоковшовыми землечерпальными снарядами. Поднимаясь поочередно на верх башни, ковши опрокидывались, и вода сливалась в приемную воронку, которая трубами соединялась с напорным резервуаром, установленным на расстоянии 200 м от башни на городском холме. Из резервуара вода поступала в городскую сеть труб.

До Коперника никто так высоко воду не поднимал. В городских трубах вода шла под напором 18 м. В те времена (XVI век) ни один город в Европе не имел такого водоподъемного механизма. Напорные трубопроводы в Париже и Лондоне появились существенно позже – спустя ~150 лет. Людовик XIV затребовал образец машины Коперника для устройства водоснабжения города Марли (вблизи Парижа).

Подобные системы Коперник построил в ряде других городов прибалтийских провинций Польши. Эти сооружения исключительно долго служили людям – почти до XIX века, а водоподъемную башню наблюдали в 70-х годах XIX века, т.е. она служила 300 лет с лишним.

Развитие капитализма, строительство заводов и фабрик поставило перед гидротехниками новые задачи: создание плотин, а следовательно, и водосбросных сооружений. Нужно было создавать более высокие напоры воды (в России в XVIII в. было построено 200 больших плотин), чтобы крутить валы машин, приводить в движение лесопильные установки, ткацкие станки, тяжелые молоты. Поэтому появляются гидросиловые установки. На Руси их называли мельницами.

Много внимания гидротехническому строительству уделял Петр I. Еще в начале XVII в. во времена смуты на Руси татары из Астрахани пытались прорыть канал между Волгой и Доном. Была выбрана трасса, начались работы, которые, однако, быстро и прекратились. К идее соединить эти реки каналом возвращались многократно. Начали эти работы при Петре I, но сил для осуществления этого проекта в государстве не хватило. Канал был построен лишь в 1952 г. Граф А.Х. Бенкендорф, когда он не был еще начальником III отделения (1801–1803 г.) и впереди его ждало «Бородино», партизанский отряд и восстановление Москвы – он был тогда боевым и уважаемым генералом, писал: «Мы... направились посетить славный Дон – край неугомонных и воинственных донских казаков. В этом месте Волгу от Дона отделяют всего 70–80 верст. Сулейман II (двенадцатый Османский султан) и Петр I хотели соединить обе реки каналом, и мы проехали по местам, где были видны следы работ, начатые в разное время этими великими людьми. Думаю, государь, который осуществит этот грандиозный проект, сделает больше для процветания и обогащения России, чем те, кто прибавляет новые губернии к и без того бескрайней ее территории. Канал дал бы возможность вывозить в Черное море продукцию плодородных частей России и соединить Каспийское море с морями Европы» [14].

В XVIII – начале XIX вв. были сооружены Вышеволоцкая, Тихвинская, Северо-Двинская, Мариинская водные системы. Последняя соединила Волгу с Балтийским морем. В 1961 г. Мариинская система была перестроена в Волго-Балтийский водный путь длиной 1100 км. Этот путь соединяет Волгу с Балтийским морем, а через Беломорско-Балтийский канал с Белым морем.

Развитие наук в России (а развитие гидротехники, немислимо без развития различных областей знаний: гидрологии, геологии, теории упругости, гидравлики и многих других) началось с созданием Петербургской Академии Наук (ПАН). Инициатором создания ПАН был Петр I. В 1721 г. он послал своего библиотекаря Шумахера в Европу для консультаций с иностранными учеными по вопросам создания Академии Наук в Петербурге. Ему вменялось в обязанности также заказать физические приборы для проведения опытов. Кроме этого, Петр I послал Парижской Академии Наук новую и верную карту Каспийского моря. Характерная деталь о финансировании ПАН – Петр обязал гг. Нарву, Дерпт, Пярну, Аренсбург отчислять на содержание Академии в общей сложности 24912 рублей ежегодно из таможенных сборов. Постановление о создании Императорской АН в Петербурге относится к 1724 г. [214], но открытие АН было уже после смерти Петра I в 1725 г. (отметим, что Берлинская АН была образована на 15 лет позже). Первым президентом АН стал Л.Л. Блюментраст (заведовал библиотекой и кунсткамерой). Среди президентов АН, за всю историю ее существования, следует выделить Екатерину Романовну Дашкову, которая возглавляла Академию Наук в течение 12 лет в конце XVIII в. Она улучшила финансирование АН, существенно пополнила библиотеку Академии, издала сочинения М.В. Ломоносова в 6-ти томах.



### Академик Михаил Васильевич Ломоносов

Родился 11 ноября 1711 года в с. Мишанинском на острове в дельте Северной Двины, вблизи г. Холмогоры в семье рыбака-владельца судна. Учился в школе при архиерейском доме и, естественно, читал духовную литературу, летописи, а также и «Арифметику» Магницкого, и «Граматику» Смотрицкого.

К 20-ти годам жажда знаний победила, и Ломоносов с обозом прибыл в Москву. Поступил в Славяно-греко-латинскую академию, где изучил 10 иностранных языков. В 1736 г. Ломоносов перешел в Университет Петербургской АН, а спустя полгода был направлен в Марбургский Университет для изучения химии и металлургии.

Кроме этого, он изучает математику, философию, метафизику. Им написаны работы по «превращению твердых тел в жидкости, в зависимости от движении предшествующей

жидкости», «О различии смешанных тел, состоящем в сцеплении корпускул» и т.д.

Писал оды, что определило новый период в Русской литературе.

В 1741 г. Ломоносов вернулся в Петербургскую Академию Наук. В 1745 г. императрица Елизавета Петровна подписала Указ о назначении его профессором (академиком) химии. Таким образом, Ломоносов – первый русский Академик. А.С. Пушкин сказал о Ломоносове: «Он создал Университет, он, лучше сказать, сам был первым нашим Университетом». 25 января 1755 г., в день мученицы Татьяны – Татьянин день, императрица подписала указ о создании Московского Университета. Умер Ломоносов в 1765 г.

Л. Эйлер писал о Ломоносове: «Ныне такие гении весьма редки, по большей части останавливаются на одних опытах и не хотят даже рассуждать о них».

Ломоносов открыл фундаментальный закон сохранения вещества, опубликованный в 1748 г. Он занимался инерцией, электрическими явлениями, тяготением, минералогией, цветобразованием, создал кинетическую теорию тепла.

Ломоносову принадлежат слова: «Российское могущество прирастать будет Сибирью и Северным океаном».

Ломоносов, Тредиаковский, Сумароков – основатели классицизма в русской литературе.

Сергей Иванович Вавилов – президент АН СССР (1945-1951 гг.) – писал: «Вместе с Петром I и Ломоносовым Эйлер стал добрым гением нашей Академии, определившим ее славу, ее крепость, ее продуктивность»

Только в 1747 г. был принят Устав АН, по которому президент Академии должен был избираться, но до 1917 г. он не избирался, а назначался Императором. После 1917 г. президента Академии Наук СССР стали избирать из числа выдающихся ученых. Эта тенденция сохранилась и в настоящее время, но теперь уже Российской Академии Наук (РАН).

До 1747 г. действительных членов называли профессорами, а затем академиками, а профессорами стали называть преподавателей Академического Университета. В Европе только Петербургская АН имела государственное финансирование, академиком предоставлялась квартира и эконо́м, оплачивались дрова. С самого начала в АН были приглашены молодые и очень талантливые ученые: отец и сыновья Бернулли, Эйлер и многие другие.

Выдающимся русским гидротехником XIX в. был инженер-путеец П.П. Мельников (1804–1880 гг.). В 1826 г. П.П. Мельников разработал проект

### Академик Даниил Бернулли

Даниил Бернулли [214] родился 29 января 1700 г. в Голландии. Семья Бернулли, его предки внесли огромный вклад в развитие Европейской науки в области математики, механики, физики и т.д., включая медицину. Они широко и плодотворно занимались дифференциальными и интегральными исчислениями.

Даниил Бернулли в 13 лет окончил гимназию в Базеле, в 16 стал магистром философии, затем изучал медицину и защитил диссертацию «О дыхании». Известность пришла к нему благодаря работам по математике, механике, и главным образом, за счет развития гидродинамики, примененным к исследованиям движения крови.

Изучал истечение жидкости из сосуда. Предшественником в этих исследованиях у него был Ньютон.

Десять раз побеждал на различных конкурсах (тогда конкурсы были в моде). К примеру, в Парижской Академии наук победила его работа «О средствах сохранять равномерность водяных и песчаных часов на море». Больше призов завоевал лишь Л. Эйлер.

В 1725 г. Даниил и его старший брат Николай были приглашены в Петербургскую Академию Наук с окладами 800 рублей и 1000 рублей в год соответственно (Николай скончался в 1726 г.).

Первый доклад Даниила в Академии – «О теории выделения соков в теле животных». За год – 10 докладов по математике, медицине, механике («Сложение и разложение сил», «Эксперименты со зрительным нервом»).

Д. Бернулли получил формулу для давления движущейся в трубе жидкости, получил зависимость скорости жидкости от высоты падения. У него есть работы о циркуляции воздуха в русских печах, о гидротехнике, о наблюдениях с помощью барометра.

Работал Д. Бернулли до 1733 г., а затем уехал в Швейцарию. Ему дали пенсию в 200 рублей и звание Почетного профессора (академика). В Базеле он работал на кафедре анатомии и ботаники, занимался устройством якорей, приливами и отливами, определением времени в море, теорией магнита и т.д. В 1746 г. Д. Бернулли сформулировал закон сохранения момента количества движения, исследовал колебания воздуха в трубах органа, боковой качкой корабля - которая применялась более 100 лет.

Гидродинамика была переведена с латинского на русский только в 1959 г. А.И. Некрасовым



расчистки порогов и строительства плотины на р. Волхов, занимался в 1828–1850 гг. улучшением судоходства на р. Западная Двина. В 1836 г. П. П. Мельников издал «Основание практической гидравлики». П.П. Мельников предложил трассу железной дороги между Москвой и Петербургом (1841–1851 гг.). Это была самая протяженная и технически совершенная дорога на тот период времени. Во второй половине XIX в. были изобретены гидравлические турбины с высоким КПД, что послужило началом строительства ГЭС. Появилась возможность передавать на большие расстояния электрическую энергию. В 1847 г. Д. Френсис изобрел радиально-осевую турбину; в 1889 г. А. Пелтон – ковшовую турбину для высоких напоров. Поворотно-лопастная турбина была предложена австрийским инженером В. Капланом (турбина Каплана) в 1920 г. и позволила использовать напоры воды в 15–60 м. Русская гидротехническая наука развивалась в основном благодаря трудам Н.Е. Жуковского (1847–1921 гг.) и Д.А. Лачинова (передача электроэнергии на дальние расстояния, 1880 г.).



*Сердюков Михаил Иванович* (1677–1754) – русский гидротехник. В 1719 году предложил проект коренного улучшения судоходства по Вышневолоцкой водной системе, одобренный Петром I. По этому проекту в 1719–1722 гг. построил плотину на р. Шлина, каналы Шлина – Ключино озеро и Шлина–Цна, а в 1736–1738 гг. плотину водораздельного Заводского водохранилища. В 1741–1752 гг. проводил работы по улучшению фарватера р. Тверца, разработал способ улучшения судоходства через Боровичские пороги (на р. Мста) и др.



*Мельников Павел Петрович* (1804–1880) – профессор прикладной механики Института инженеров путей сообщения. Важнейшим направлением своей разносторонней практической деятельности считал гидротехнику. Ему принадлежат решения по улучшению судоходства на реках Волхов и Западная Двина. Труд П.П. Мельникова «Основание практической гидравлики» долгое годы был основным учебным пособием по гидравлике в России

Николай Егорович Жуковский – ученый международного уровня. Им выполнен огромный объем самых разнообразных исследований. Для гидротехники важны его работы по гидромеханике и теории гидравлического удара, которые являются основополагающими при расчете водоводов.

Большое значение имели труды В.М. Лохтина и Н.С. Леявского по гидрологии и русловым процессам. В.Н. Чиколаев и Р.Э. Классон (1895 г.) построили первую ГЭС с выработкой трехфазного тока – Охтинскую ГЭС общей мощностью 260 кВт. Систему трехфазного тока, включая асинхронный двигатель, в 1888 г. изобрел русский ученый М.О. Доливо-Добровольский, а в 1891 г. он осуществил первую передачу трехфазного тока на расстояние 175 км с напряжением 8000 В.

Одним из значительных достижений мировой гидротехники явилось создание Суэцкого канала, соединившего Средиземное и Красное моря, что существенно сократило путь из Средиземного моря в Индийский океан. Идея строительства канала родилась у дипломата и родственника Наполеона III виконта Фердинанда Мари де Лессепса в период его службы французским консулом в Каире на основе изучения истории и географии. На месте будущего города, названного в честь правителя этого государства Порт-Саидом, 25 апреля 1859 г. объявляется начало строительства. Строится сравнительно простое со-

оружие, так как из-за отсутствия перепада в отметках воды и спокойного и невысокого рельефа по трассе канала не было необходимости строить шлюзы. Длина составляла 160 км и он должен был обеспечивать пропуск морских судов. Несмотря на огромные трудности канал был завершён в 1869 г. Великолепные торжества, посвященные открытию канала, состоялись 17 ноября 1869 г. Создатель Суэцкого канала де Лессепс сказал на открытии канала: «Прошло 35 столетий с тех пор, как воды Красного моря отступили по приказу Моисея. Теперь по приказу правителей Египта они возвратились на место!» Великий Д. Верди к этому празднику не успел завершить свою самую гениальную оперу «Аида», которая была поставлена в Каире в 1871 г., а на открытии в новом оперном театре давали «Риголетто» тоже Д. Верди. За три года канал окупился, с 1872 г. стал давать прибыль. Этим строительством де Лессепс завоевал всемирную славу. Будучи на вершине славы, он начинает осуществление еще одного великого проекта – соединение Атлантического и Тихого океана через Панамский перешеек. Но ошибки проекта, неправильные подсчеты объемов работ, эпидемии среди рабочих (к 1887 г. от малярии и тропической лихорадки умерло до 40 тыс. рабочих) разорили Компанию межконтинентального канала. Создатель этой компании – де Лессепс оказался в тюрьме, где и окончилась его жизнь. Этому великому организатору и романтику строительства в Порт-Саиде стоит памятник со словами «Открыть народам мир».

Продолжили строительство Панамского канала США. Они выплатили французам 40 млн долл. возмещения за сделанное. В 1907 г. начальником строительства был назначен инженер-полковник Джордж Вашингтон Гоутхаус, который вдохнул жизнь в строительство. В ходе этого строительства впервые на научную основу была поставлена борьба с эпидемиями. Для борьбы с оползнями пришлось выполнить земельные работы объемом 260 млн м<sup>3</sup>. Французы ошиблись в подсчете объемов работ в 5 раз, допустив ошибки при инженерно-геологических изысканиях. Длина канала составила 81 км. Этот канал уже имел шлюзы – две нитки по три шлюза с камерами 300×33 м. 15 августа 1914 г. президент Панама Велазарио Поррас открыл канал. Панамский канал был признан мировым сообществом одним из 10 великих строительных сооружений XX в., но на первое место был поставлен Асуанский гидроузел, построенный СССР в Египте (ГИП – Н.А. Малышев, начальники строительства – И.В. Комзин и А.П. Александров, главный инженер строительства – Г.А. Радченко).

XX век – век огромного гидротехнического строительства и прежде всего энергетического. Строительство во всем мире привело к появлению большого количества инженеров, ученых, организаторов строительства. О некоторых из них еще будет сказано в дальнейшем, а здесь отметим двух инженеров. Иван Гаврилович Александров (1875–1936 гг.) – москвич, выходец из небогатой семьи. В 1898 г. он поступил в Московский институт инженеров путей сообщения, который закончил в 1901 г. Это весьма редкий случай столь быстрого окончания очень серьезного технического вуза. Он разработал проекты мостов

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	3
<b>Раздел первый. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОДНОМ ХОЗЯЙСТВЕ. УСЛОВИЯ РАБОТЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ И ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЕ</b> .....	5
<b>ГЛАВА 1. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ</b> .....	5
1.1. Некоторые сведения о гидротехнике и гидротехниках .....	5
1.2. Водные ресурсы и водное хозяйство .....	18
1.3. Общие понятия о гидротехнических сооружениях .....	21
1.4. Гидротехническое строительство и охрана окружающей среды .....	28
Вопросы к главе 1 .....	33
<b>ГЛАВА 2. НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ</b> .....	34
2.1. Классификация нагрузок и воздействий .....	34
2.2. Вес конструкций и сооружений .....	35
2.3. Гидростатическое давление .....	36
2.4. Гидродинамическое воздействие воды .....	37
2.5. Кавитация .....	41
2.6. Аэрация .....	44
2.7. Нагонные явления, ветровые волны и их воздействие на сооружения .....	45
2.8. Воздействие льда .....	50
2.9. Давление наносов .....	52
2.10. Абразивное воздействие наносов .....	53
Вопросы к главе 2 .....	53
<b>ГЛАВА 3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА НА СООРУЖЕНИЯ, РУСЛО И БЕРЕГА</b> .....	54
3.1. Основы теории фильтрации воды .....	54
3.2. Методы решения фильтрационных задач .....	61
3.3. Фильтрационные деформации в грунтах основания и тела грунтовых плотин .....	82
Вопросы к главе 3 .....	87
<b>ГЛАВА 4. ПРОПУСК ВОДЫ ЧЕРЕЗ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ</b> .....	89
4.1. Основные типы водопропускных сооружений .....	89
4.2. Водосбросные сооружения и их гидравлический расчет .....	93
4.3. Режимы сопряжения бьефов и гашение избыточной энергии сбросных потоков .....	102
4.4. Деформации русла при гидротехническом строительстве .....	112
4.5. Выбор удельного расхода воды в нижнем бьефе водопропускных сооружений .....	116
Вопросы к главе 4 .....	118

<b>ГЛАВА 5. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ</b> .....	119
5.1. Общие положения .....	119
5.2. Гармонизация – системная методология проектирования гидросооружений .....	123
5.3. Основные принципы инженерных расчетов .....	132
5.4. Вероятностный метод расчета гидросооружений .....	
5.5. Решение типовых гидротехнических задач в вероятностной постановке .....	137
5.6. Нормативная вероятность безотказной работы и ее связь с коэффициентом запаса .....	139
Вопросы к главе 5 .....	144
<b>Раздел второй. ВОДОПОДПОРНЫЕ И ВОДОСБРОСНЫЕ СООРУЖЕНИЯ</b> .....	147
<b>А. БЕТОННЫЕ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ПЛОТИНЫ</b> .....	147
<b>ГЛАВА 6. ОСНОВЫ ТЕОРИИ БЕТОННЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПЛОТИН</b> .....	147
6.1. Материалы для бетонных и железобетонных плотин .....	147
6.2. Общие сведения о гравитационных плотинах. Их поперечные профили .....	153
6.3. Расчет напряжений в теле плотины элементарным методом .....	160
6.4. Расчет напряжений в гравитационных плотинах методом теории упругости .....	164
6.5. Расчет напряжений в гравитационной плотине и ее основании, совместно работающих как единый комплекс .....	174
6.6. Влияние на напряженное состояние плотины силового воздействия фильтрующей воды, температурно-влажностных воздействий и других факторов .....	180
6.7. Общие положения оценки прочности и устойчивости гравитационных плотин .....	190
Вопросы к главе 6 .....	193
<b>ГЛАВА 7. БЕТОННЫЕ ВОДОСБРОСНЫЕ ПЛОТИНЫ НА НЕСКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЯХ</b> .....	194
7.1. Инженерно-геологические свойства нескальных грунтов .....	194
7.2. Схемы бетонных плотин на нескальном основании. Подземный контур плотины .....	200
7.3. Элементы подземного контура .....	210
7.4. Конструкции плотин и устройств нижнего бьефа .....	213
7.5. Расчеты прочности водосливных плотин и их элементов .....	231
7.6. Расчет устойчивости бетонных плотин на нескальных основаниях .....	234
7.7. Сборные и сборно-монолитные ячеистые плотины и сопрягающие открылки устоев .....	239
7.8. Совмещение в гидроузлах на нескальном основании в одном сооружении водосбросных плотин и зданий гидроэлектростанций .....	242
Вопросы к главе 7 .....	244

<b>ГЛАВА 8. БЕТОННЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ ПЛОТИНЫ НА СКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЯХ</b> .....	245
8.1. Общие сведения .....	245
8.2. Скальные основания, их подготовка и улучшение .....	249
8.3. Конструкции плотин и их элементов .....	256
8.4. Устойчивость плотин и прочность их скальных оснований .....	269
8.5. Облегченные гравитационные плотины .....	272
Вопросы к главе 8 .....	278
<b>ГЛАВА 9. БЕТОННЫЕ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ КОНТРФОРСНЫЕ ПЛОТИНЫ</b> .....	279
9.1. Общие сведения. Классификация .....	279
9.2. Массивно-контрфорсные плотины .....	281
9.3. Контрфорсные плотины с плоскими перекрытиями .....	287
9.4. Многоарочные плотины .....	290
9.5. Расчет общей прочности и устойчивости контрфорсных плотин .....	296
9.6. Расчет прочности напорных перекрытий контрфорсных плотин .....	300
9.7. Условие применения различных типов контрфорсных плотин и пути их дальнейшего развития .....	311
Вопросы к главе 9 .....	313
<b>ГЛАВА 10. БЕТОННЫЕ АРОЧНЫЕ ПЛОТИНЫ</b> .....	314
10.1. Общие сведения .....	314
10.2. Статический расчет арочных плотин .....	322
10.3. Расчет арочных плотин по методу независимых арок .....	329
10.4. Расчет арочных плотин по методу центральной консоли .....	330
10.5. Проектирование арочных плотин .....	339
10.6. Конструкции арочных плотин .....	347
Вопросы к главе 10 .....	352
<b>Б. ПЛОТИНЫ ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	353
<b>ГЛАВА 11. ПЛОТИНЫ ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И СВОЙСТВА ГРУНТОВ ТЕЛА ПЛОТИНЫ</b> .....	353
11.1. Типы грунтовых плотин .....	353
11.2. Физико-механические характеристики грунтов .....	355
11.3. Деформируемость грунтов .....	360
11.4. Прочность грунтов .....	368
Вопросы к главе 11 .....	373
<b>ГЛАВА 12. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН</b> .....	374
12.1. Фильтрация воды в грунтовых плотинах .....	374
12.2. Дренажные устройства .....	380
12.3. Поровое давление и консолидация грунтов .....	388
12.4. Напряженно-деформированное состояние плотин .....	402
12.5. Устойчивость откосов .....	413
12.6. Сопряжение грунтовых плотин с основанием .....	420
Вопросы к главе 12 .....	428

<b>ГЛАВА 13. КОНСТРУКЦИИ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН .....</b>	<b>429</b>
13.1. Земляные насыпные плотины .....	429
13.2. Земляные намывные плотины.....	439
13.3. Каменно-земляные плотины .....	450
13.4. Каменные плотины .....	459
13.5. Особенности плотин, возводимых направленным взрывом .....	472
13.6. Особенности плотин, возводимых в тяжелых климатических условиях.....	484
13.7. Водопропускные сооружения в грунтовых плотинах .....	494
13.8. Выбор типа грунтовой плотины .....	503
Вопросы к главе 13 .....	506
<b>В. ПЛОТИНЫ ПРОЧИХ ТИПОВ И БЕРЕГОВЫЕ ВОДОСБРОСЫ .....</b>	<b>508</b>
<b>ГЛАВА 14. ПЛОТИНЫ ПРОЧИХ ТИПОВ .....</b>	<b>508</b>
14.1. Деревянные плотины .....	508
14.2. Тканевые плотины .....	525
14.3. Стальные и габионные плотины.....	529
Вопросы к главе 14 .....	530
<b>ГЛАВА 15. БЕРЕГОВЫЕ ВОДОСБРОСЫ .....</b>	<b>531</b>
15.1. Условия применения и типы береговых водосбросов.....	531
15.2. Поверхностные водосбросы.....	535
15.3. Туннельные водосбросы.....	546
15.4. Шахтные водосбросы .....	555
15.5. Вихревые водосбросы и гасители .....	563
15.6. Комбинированные туннельные водосбросы .....	566
15.7. Выбор типа берегового водосброса .....	570
Вопросы к главе 15 .....	571

## *Учебник*

Леонид Николаевич Рассказов  
Валентин Гаврилович Орехов  
Николай Алексеевич Анискин  
Вячеслав Васильевич Малаханов  
Александра Станиславовна Бестужева  
Михаил Петрович Саинов  
Павел Владимирович Солдатов  
Виктор Васильевич Толстик

# **ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ**

В двух частях

## **Часть 1**

Компьютерная верстка: *В.В. Сергеев, В.П. Бурмакин*  
Дизайн обложки: *Н.С. Романова*  
Редактор: *В.П. Бурмакин*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.  
Подписано к печати 10.05.2011. Формат 70×100/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.  
Усл. 36,0 п.л. Тираж 1000 экз. Заказ №

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)  
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511  
тел., факс: (495) 183-56-83, e-mail: [iasv@mgsu.ru](mailto:iasv@mgsu.ru), <http://www.iasv.ru/>