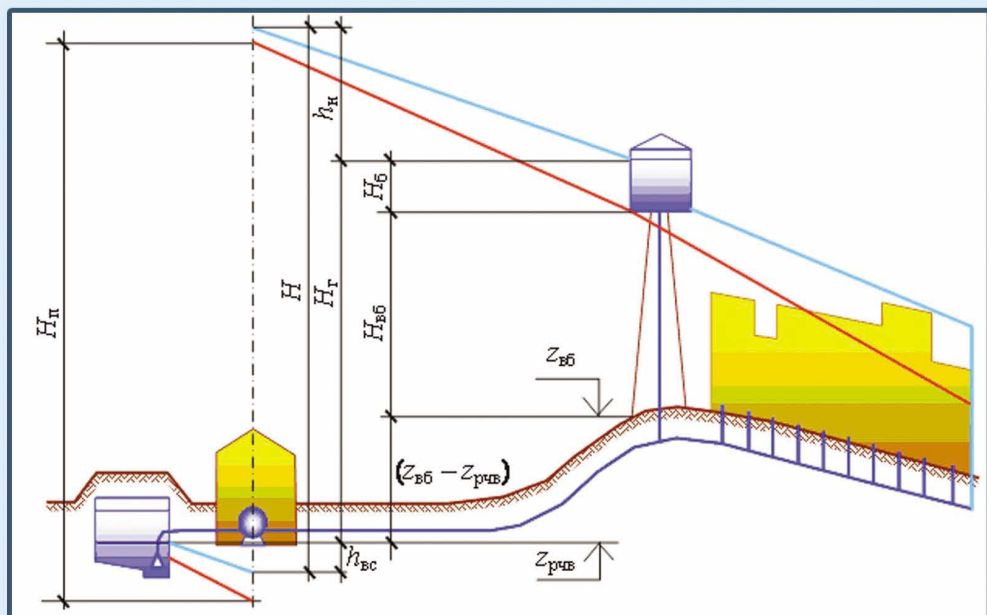


С.Ш. Сайридинов

# ГИДРАВЛИКА СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ



**С.Ш. Сайридинов**

# **ГИДРАВЛИКА СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ**

Издание 2-е, переработанное и дополненное

Допущено Министерством образования Российской Федерации  
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по специальности «Водоснабжение и водоотведение»  
направления подготовки дипломированных специалистов  
«Строительство»



Москва 2012  
Издательство АСВ

УДК 532.1: 532.2: 532.542: 628.14 (075.8)

***Рецензенты:***

кафедра гидравлики Московского государственного строительного университета (зав. каф., д.т.н., проф. *В.С. Боровков*),

кафедра водоснабжения Московского государственного строительного университета (зав. каф., проф. *М.А. Сомов*).

**Сайридинов С.Ш.**

Гидравлика систем водоснабжения и водоотведения: Учеб. пособие. – М.: Издательство АСВ, 2012. – 352 с.

Научный редактор: д.т.н., проф. Ю.И. Вдовин

**ISBN 978-5-93093-247-8**

Рассматривается техническая гидравлика и ее практическое приложение, относящееся к вопросам гидростатики, движения воды в трубах, истечения из резервуаров. Рассмотрены основы теории подобия и вопросы моделирования гидравлических явлений. Для удобства изучения и облегчения самостоятельной проработки основополагающий материал изложен с учетом требований соответствующих разделов учебных программ. Каждая глава дополнена примерами решения задач, и в приложении приведены необходимые справочные данные для выполнения гидравлического расчета водохозяйственных систем.

**ISBN 978-5-93093-247-8**

© Издательство АСВ, 2012

© Сайридинов С.Ш., 2012

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Гидравлика является одной из основных дисциплин учебного плана подготовки инженеров-строителей по специальности «Водоснабжение и водоотведение».

Изучение ряда дисциплин специальности «Водоснабжение и водоотведение» базируется на знаниях гидравлических закономерностей и их практического приложения, относящихся к вопросам гидростатики движения жидкостей в трубопроводах и каналах.

Изучение дисциплины «Гидравлика» может быть обеспечено после изучения следующих дисциплин: математика, физика, химия, инженерная геодезия, инженерная геология, теоретическая механика, технология металлов и сопротивление материалов.

Книга написана в полном соответствии с примерной программой подготовки специалистов по ОКСО 270100 «Строительство», где излагаются теоретические основы гидравлики - наиболее важные положения учения о равновесии и движении жидкости, применяющиеся для решения частных практических вопросов систем водоснабжения и водоотведения; подробно рассматриваются физические свойства жидкостей и газов; сведения о газовых законах.

Для удобства обучения и облегчения самостоятельной проработки, основополагающий материал последовательно изложен с учетом требований соответствующих разделов учебных программ. Каждая глава настоящего пособия дополнена примерами, основное назначение которых - помочь изучающему выработать навыки применения теории в решении конкретных задач и освоить методику гидравлических расчетов.

Издание настоящей работы вызвано безотлагательной необходимостью заполнения дефицита в обеспечении учебниками высших учебных заведений в соответствии с происходящей структурной реорганизацией вузов (в частности, образования университетов на базе технических вузов) и повсеместным переходом к многоуровневой подготовке специалистов по отдельным направлениям.

В книге применена Международная система СИ. В некоторых главах использована также система МКГСС, положенная в основу технических нормативных документов (ГОСТ, СНиП и т. д.).

Автор выражает глубокую признательность коллективу кафедры гидравлики Московского государственного строительного университета (доктору технических наук, профессору В.С. Боровкову) и профессору М.А. Сомову (МГСУ) за замечания и полезные советы, сделанные при рецензировании рукописи учебного пособия.

## ВВЕДЕНИЕ

Система водоснабжения - это комплекс инженерных сооружений и устройств, обеспечивающих получение воды из природных источников, ее кондиционирование до требований потребителя, транспортирование и подачу воды потребителям в необходимых количествах, под требуемым напором и при соблюдении требований надежности. Водохозяйственные системы городов и промышленных предприятий оснащены современными комплексами самотечных и напорных трубопроводов и других специальных сооружений, реализующих отведение, очистку, обезвреживание и использование воды и образующихся осадков. Такие комплексы называются водоотводящей системой. Расчет и проектирование сетей и сооружений систем водоснабжения и водоотведения и принятия более приемлемого технико-экономического решения полагается на правильное изучение и использование гидравлических закономерностей.

**Гидравлика** - одна из общих технических наук, изучающая законы равновесия и движения жидкостей, их взаимодействие с твердыми телами и разрабатывающая методы применения этих законов для решения конкретных практических задач. Законы движения жидкостей изучает гидромеханика. Гидромеханику, также как и другие области механики, разделяют на статику, кинематику и динамику. Часть гидромеханики, изучающая условия равновесия жидкостей, называется гидростатикой. Кинематика жидкостей изучает их движение во времени, не объясняя причины, вызывающие это движение. Предметом изучения гидродинамики является движение жидкостей.

В природе различают четыре агрегативных состояния вещества: твердое, жидкое, газообразное и плазменное. Все жидкости разделяют на два класса: капельные и газообразные. К первым относятся вода, нефть, бензин, керосин, спирт, масло и др., а ко вторым - газы. Объектом изучения в гидравлике являются капельные жидкости. Основное отличие жидкостей - текучесть, т.е. малое сцепление частиц, отсутствие сил трения между частицами в состоянии покоя, поэтому жидкость принимает форму сосуда, резервуара, водоема. При изучении общих закономерностей гидравлики часто используют понятие идеальной жидкости - несжимаемой среды, не обладающей внутренним трением между отдельными частицами. Идеальная жидкость, в отличие от реальной, считается совершенно несжимаемой и нерасширяющейся средой, обладающей абсолютной подвижностью частиц, в которой полностью отсутствуют силы внутреннего трения (вязкости).

**История и развитие гидравлики.** В Греции еще за 250 лет до н.э. начали использовать трактаты, в которых уже выполнялись достаточно серьезные для того времени теоретические обобщения отдельных вопросов механики жидкости. Математик и механик того времени Архимед (ок. 287-212 гг. до н.э.) написал трактат «О плавающих телах». Им же была разработана конструкция механизма для подъема воды, названная «архимедовым винтом».

*Эпоха Возрождения.* Леонардо да Винчи (1452-1519) - итальянский ученый. Вел научные исследования в самых различных областях, в частности, он изучал принцип работы гидравлического пресса, аэродинамику летательных аппаратов, образование водоворотных областей, отражение и интерференцию волн, истечение жидкости через отверстия и водосливы и другие гидравлические вопросы. Изобрел центробежный насос, парашют, анемометр. Различные работы Леонардо отражены в сохранившихся 7 тыс. страниц его рукописей, хранящихся в библиотеках Лондона, Парижа, Милана и Турина. Однако его записи были опубликованы лишь 400 лет спустя, поэтому его труды по гидравлике оказались неиспользованными. Справедливо будет признать, что Леонардо да Винчи является основоположником механики жидкости.

Симон Стевин (1548-1620) - нидерландский математик-инженер. Определил величину гидростатического давления на плоскую фигуру и в 1585 г. опубликовал книгу «Начала гидростатики».

Галилео Галилей (1564-1642) - итальянский физик, механик и астроном. Он показал, что гидравлические сопротивления возрастают с увеличением скорости и плотности жидкой среды. Разъяснил вопрос о вакууме. В 1612 г. опубликовал трактат «О телах, находящихся в воде, и о тех, которые в них движутся».

*Период XVII века и начало XVIII века.* В это время механика жидкости все еще находилась в зачаточном состоянии. Вместе с тем здесь можно отметить имена следующих ученых, способствовавших ее развитию.

Кастелли (1577-1644) - итальянский математик. В ясной форме изложил принцип неразрывности.

Эванджелиста Торричелли (1608-1647) - итальянский ученый, ученик Галилея. Занимался вопросами движения жидкости. В 1643 г. вывел формулу скорости истечения невязкой (идеальной) жидкости из отверстия и изобрел ртутный барометр.

Блез Паскаль (1623-1662) - французский ученый. Установил, что значение гидростатического давления не зависит от ориентировки

площадки действия. Обосновал вопрос о вакууме. В 1650 г. дал свой закон о передаче жидкостью внешнего давления, который явился основой для расчета гидравлических прессов, подъемников.

**Середина и конец XVIII века.** Формируются теоретические основы современной механики жидкости. В XVIII веке в Петербургской Академии наук рядом ученых (Бернулли, Эйлером, Ломоносовым) были разработаны теоретические основы механики жидкости, позволившие выделить ее в самостоятельную науку.

Даниил Бернулли (1700-1782) - выдающийся физик и математик - родился в Гронингене (Голландия). С 1725 по 1733 гг. жил в Петербурге, являлся профессором и членом Петербургской Академии наук. В Петербурге он написал свой знаменитый труд «Гидродинамика», который был впоследствии опубликован (1738) в г. Страсбурге. В этих исследованиях он дал уравнение, носящее его имя и являющееся одним из основных уравнений гидравлики.

Леонард Эйлер (1707-1783) - великий математик, механик и физик - родился в г. Базеле (Швейцария). С 1727 г. жил в Петербурге. Был членом Петербургской Академии наук. В 1755 г. он составил известные дифференциальные уравнения движения и относительно-го равновесия жидкости, носящее его имя, и положил начало теоретической гидромеханики, изучающей законы движения жидкостей методом математического анализа.

М.В. Ломоносов (1711-1765) - знаменитый русский ученый. В 1760 г. написал и опубликовал диссертацию «Рассуждение о твердости и жидкости тела», в которой он изложил положенный в основу гидравлики закон сохранения массы и энергии.

Ж. Д.'Аламбер (1717-1783) - французский ученый-математик и философ, член Парижской и Петербургской Академии наук (с 1746 г.). Опубликовал ряд трактатов, относящихся к равновесию и движению жидкости. Предполагают, что Д'Аламбер первый отметил возможность кавитации жидкости.

В указанный период существенный вклад в развитие механики внесли два выдающихся французских математика того времени:

Ж. Лагранж (1736-1813), который ввел понятие потенциала скорости и исследовал волны малой высоты.

П. Лаплас (1749-1827), создавший, в частности, особую теорию волн на поверхности жидкости.

**Середина и конец XVIII века.** Зарождается техническое (прикладное) направление механики жидкости. Наряду с теоретически-

ми работами по гидромеханике и гидравлике стал прививаться экспериментальный, т.е. опытный, способ изучения ряда ее законов, давший обоснование и развитие практической гидравлики. В середине и в конце XVIII века во Франции начала постепенно образовываться особая школа - школа ученых инженеров, которые стали формировать механику как прикладную (механическую) науку. К концу XVIII века французская школа стала основной гидравлической школой в области технических наук.

В развитии практической гидравлики сыграли важную роль работы французских ученых XVIII-XIX веков Шези, Базена, Дарси и др.

А. Пито (1695-1771) - инженер гидротехник, член Парижской Академии наук, изобретатель «прибора Пито».

А. Шези (1718-1798) - директор Французской школы мостов и дорог, сформулировавший параметры подобия потоков и обосновавший формулу, носящую его имя.

Ж. Борда (1733-1799) - военный инженер, который занимался вопросами истечения жидкостей из отверстий и нашел потери напора при резком расширении потока.

П. Дюбуа (1734-1809) - инженер-гидротехник и военный инженер, составивший обобщающий труд «Принципы гидравлики».

Техническое направление механики жидкости развивалось и в других странах. Здесь можно отметить итальянского профессора Д. Вентури (1746-1822) и немецкого ученого, инженера Р. Вольмана (1757-1837).

**Развитие технической механики жидкости в XIX веке за рубежом.** Зародившееся во Франции техническое направление механики жидкости быстро начало развиваться как в самой Франции, так и в других странах. В этот период были разработаны или решены следующие проблемы:

- основы теории плавноизменяющегося неравномерного движения жидкости в открытых руслах (Беланже, Кориолис, Сен-Венан, Буден, Бресс, Буссинеск);
- вопрос о гидравлическом прыжке (Бидоне, Беланже, Бресс, Буссинеск);
- экспериментальное определение параметров, входящих в формулу Шези (Баден, Маннинг, Гангилье, Куттер);
- составление эмпирических и полуэмпирических формул для определения гидравлических сопротивлений в различных случаях (Кулон, Хаген, Сен-Венан, Пуазейль, Дарси, Вейсбах, Буссинеск);
- открытие двух режимов движения жидкости (Хаген, Рейнольдс);



- получение так называемых уравнений Навье Стокса, а также уравнений Рейнольдса на основе использования модели осредненного турбулентного потока (Сен-Венан, Рейнольдс, Буссинеск);
- установление принципов гидродинамического подобия, а также критериев подобия (Коши, Риич, Фруд, Гельмгольц, Рейнольдс);
- основы учения о движениях грунтовых вод (Дарси, Дюпюи, Буссинеск);
- теории волн (Герстнер, Сен-Венан, Риич, Фруд, Стокс, Гельмгольц, Базен, Буссинеск);
- вопросы истечения жидкости через водосливы и отверстия (Беланже, Кирхгоф, Базен, Буссинеск, Барда, Вейсбах).

В этот период изучались также взвесенесущие потоки (Форг, Дюпюи), неустановившееся движение (Сен-Венан, Буссинеск, Дюпюи).

**Зарождение, развитие технической механики жидкости в XIX в. в России.** Прикладное, инженерное направление механики жидкости, зародившееся еще в работах М.В. Ломоносова, стало развиваться в России в XIX в. в стенах Петербургского института инженеров путей сообщения.

П.П. Мельников (1804-1880) - инженер путей сообщения, профессор прикладной механики, министр путей сообщения, почетный член Петербургской Академии наук. Он создал первый на русском языке курс «Основания практической гидравлики...», а также организовал в 1855 г. первую в России учебную гидравлическую лабораторию.

Большой вклад внесли в развитие гидравлики следующие русские ученые и инженеры:

Н.П. Петров (1836-1920) - русский физик, ученый-инженер, почетный член Петербургской Академии наук (инженер генерал-лейтенант). В 1883 г. в своем труде «Трение в машинах и влияние на него смазывающей жидкости» впервые сформулировал законы трения при наличии смазки.

Н.Е. Жуковский (1847-1921) - великий русский ученый, профессор Московского высшего технического училища и Московского университета, создатель теории гидравлического удара, фильтрации грунтовых вод, движения взвешенных наносов в водных потоках, исследовавший также многие другие вопросы механики жидкости, которые получили мировую известность.

Д.И. Менделеев (1834-1907) - знаменитый русский ученый. В 1880 г. в своем сочинении «О сопротивлении жидкостей и о воздухоплавании» указывал на существование в природе двух режимов движения жидкости с различными ее сопротивлениями. Несколькоми годами позже английский ученый О. Рейнольдс провел опыты,

наглядно подтвердившие гипотезу Менделеева о существовании ламинарного и турбулентного движения жидкостей.

И.С. Громека (1851-1889) - профессор Казанского университета, разработавший теорию капиллярных явлений и заложивший основы теории так называемых винтовых потоков.

*Развитие гидравлики в XX веке.* Ф. Форхгеймер (1852-1933) - немецкий профессор - рассмотрел гидравлические сопротивления, волны перемещения, колебания горизонтов воды в уравнильных резервуарах ГЭС. Особенно важны исследования Форхгеймера в области вопросов фильтрации.

М. Вебер (1871-1951) - немецкий профессор - придал принципам гидродинамического подобия современные формы.

Л. Прандтль (1875-1953) - немецкий профессор, инженер - разработал (наряду с Тейлором и Карманом) полуэмпирическую теорию турбулентности; исследовал гидравлические сопротивления в трубах. Работы Прандтля в области теории пограничного слоя явились основополагающими.

М.А. Великанов (1879-1964) - советский ученый, член-корреспондент АН СССР - разработал теорию турбулентности, исследовал движение насосов и русловые деформации, предложил так называемую гравитационную теорию движения взвешенных насосов.

Б.А. Бахметев (1880-1951) - русский ученый, инженер путей сообщения - работал в Петербургском политехническом институте, заложил основы современной русской гидравлической школы, опубликовал ряд книг, в которых осветил различные разделы гидравлики. Бахметев решил в достаточно общей форме задачу об интегрировании дифференциального уравнения неравномерного движения в призматических руслах.

Блазиус (р. 1883 г.) - немецкий ученый - впервые показал, что для "гладких труб" коэффициент сопротивления зависит только от одного параметра - числа Рейнольдса.

Н.Н. Павловский (1886-1937) - советский ученый, академик, инженер путей сообщения - в 1922 г. опубликовал основы математической теории фильтрации воды в грунтах; предложил метод электромоделирования фильтрационных потоков (метод ЭГДА); издал первый в России «Гидравлический справочник» и монографию по основам гидравлики; решил ряд гидравлических задач, относящихся к инженерно-строительной гидравлике.

Н.М. Вернадский (1882-1935) - советский ученый, инженер путей сообщения - впервые связал определение тепловых потерь с полем

скоростей в прудах-охладителях, предложил важную модель “планового потока”, нашедшую себе широкое применение.

Большой вклад в формирование технической механики жидкости внесли отечественные ученые, особенно после Октябрьской революции, когда забота о развитии науки стала государственным делом Советской Республики.

Таким образом, наука о механике жидкости зародилась еще в трудах Архимеда и к середине XIX века получила значительное развитие, причем в этот период времени произошло разделение механики жидкостей на два различных направления: математическую и техническую механику жидкости.

Г. Рауз и С. Инце в своей известной книге «История гидравлики» отмечают, что математическая механика жидкости зародилась еще в трудах Л.Эйлера (в середине XVIII в.). Что касается технической механики жидкости (гидравлики), то это направление механики начало развиваться главным образом в работах французских ученых-инженеров.

Нужно подчеркнуть, что в начале XIX века техническая механика жидкости начала, в свою очередь, расчленяться на отдельные направления. К таким направлениям можно отнести, например, инженерно-строительную (гидротехническую) гидравлику, гидромашинную гидравлику, судостроительную гидравлику, нефтяную и газовую гидравлику и т.п. Разумеется, теоретические основы этих отдельных гидравлик в значительной мере общие.

В начале XX века ведущая роль в области технической механики жидкости (гидравлики) перешла от старой французской гидравлической школы к немецкой школе, которую возглавил ряд немецких ученых. Однако после Октябрьской революции в связи с бурным развитием в нашей стране гидротехнического строительства в СССР был создан целый ряд научно-исследовательских институтов, разрабатывающих различные гидромеханические проблемы; было организовано большое число вузов инженерно-строительного, в частности гидротехнического, профиля.

В послереволюционный период появилась обширная литература (журналы, труды институтов, монографии и т.п.), освещающая самые различные стороны технической гидромеханики; а в скором времени наша, отечественная гидравлика выдвинулась на одно из первых мест в мире.

Следует отметить работы В.И. Чарномского, А.Я. Миловича, И.И. Агроскина, А.И. Богомолова, А.В. Караушева, Ш.Д. Чертоусо-

ва, Р.Р. Чугаева, К.В. Гришанина, Г.В. Железнякова, В.А. Большакова, В.В. Смылова, А.Д. Альтшуля, Ю.М. Контантинова и других ученых и специалистов, благодаря которым русской и советской инженерной гидравлике принадлежит ведущее положение в мировой науке.

Большой практический и теоретический интерес представляют работы в области теории неравномерного движения воды в открытых призматических и естественных руслах, принадлежащие А.И. Рахманову, М.Д. Чертоусову Р.Р. Чугаеву И.И. Леви и др. Крупные исследования турбулентного режима движения жидкости, выполненные А.Н. Колма-горовым, М.А. Великановым, Г.А. Гуржиенко и др., являются также ценным вкладом в дело развития современной гидравлики. Большой интерес представляют работы С.А. Христиановича, который предложил общий метод интегрирования уравнений неустановившегося движения.

**От автора.** Огромный вклад в развитие современной инженерной гидравлики внесли ученые кафедры гидравлики Московского инженерно-строительного института (ныне государственного строительного университета) - головного строительного вуза страны. Кафедра была основана в 1929 г. Ее первым заведующим кафедрой был профессор Кузнецов Владимир Николаевич. Деятельность кафедры в первые годы ее существования была связана с обеспечением серьезной гидравлической подготовки инженеров-строителей, выпускаемых МИСИ. Подготовка курсов гидравлики, ориентированных на различные строительные специальности, разработка системы учебных пособий, набора задач и курсовых работ, создание и развитие лабораторной базы, - таковыми были первые заботы кафедры. В этот период и в последующие годы большой вклад в создание кафедры, формирование ее педагогического и научного коллектива внес профессор Петр Григорьевич Киселев.

**Киселев Петр Григорьевич** (1890-1981 гг.) - профессор, автор уникальных справочников по гидравлическим расчетам и ряда известных учебников по гидравлике. Предложил метод расчета эжекторов водосливных сооружений и каналов. Разработал ряд основополагающих проблем гидравлики. Выдающийся педагог, подготовил многих талантливых инженеров и исследователей-гидравликов. Профессором П.Г. Киселевым рассмотрены классические вопросы гидравлики: о физической природе сопротивления тел сдвигу, об энергетической интерпретации уравнения Бернулли, о гидравлике водослива с широким порогом и измерительных водо-

сливах произвольной формы. П.Г. Киселевым значительно развита теория водоструйных эжекторов, изучены вопросы потерь энергии, возникающих при слиянии потоков.

С 1946 по 1961 гг. кафедрой возглавлял профессор, д.т.н., генерал-майор Владимир Дмитриевич Журин.

**Журин Владимир Дмитриевич** (1892-1963 гг.) - участник составления плана ГОЭЛРО, организатор и руководитель Волгостроя, главный инженер строительства канала Москва-Волга. Председатель секции АН СССР. Автор методов гидравлического расчета каналов и предложений по новым конструкциям водосбросных сооружений и водобойных устройств.

С 1948 г. при кафедре гидравлики была создана специальность «Гидромеханизация строительных работ» в связи с возведением крупнейших намывных сооружений на гидроэлектростанциях Волжского каскада. В связи с этим на кафедру были приглашены профессор, д.т.н. Андрей Павлович Юфин, который возглавлял кафедру с 1961 по 1971 гг.; профессор, д.т.н. Леонид Степанович Животовский, профессор Федор Матвеевич Долгачев.

**Юфин Андрей Павлович** (1909-1987 гг.) - основоположник методов расчета гидротранспортирования твердых материалов потоками воды. Инициатор строительства комплекса гидравлических лабораторий. Автор монографий и учебников по гидротранспорту и оборудованию гидромеханизации, создал школу гидравлики двухфазных течений.

Научные разработки, выполненные коллективом исследователей под руководством А.П. Юфина, внедрены на стройках гидроэлектростанций Волжского каскада и гидрошахтах Донбасса. Научные разработки кафедры составили основу 10 монографий и учебников по гидротранспорту и гидромеханизации.

С 1960 г. после объединения двух строительных вузов Москвы - МИСИ и МИИГС тематика исследований кафедры расширилась. Под руководством и непосредственном участии профессора, д.т.н. Адольфа Давидовича Альтшуля стало активно развиваться научное направление, связанное с гидравлическим сопротивлением трубопроводов и открытых каналов.

**Альтшуль Адольф Давидович** (1913-1994 гг.) - основоположник научной школы гидравлических сопротивлений. Предложил формулы для определения коэффициентов  $\lambda$ , и Шези  $S$ . Автор известных монографий, учебников и учебных пособий, активно

внедрявший научные достижения в учебный процесс. Постоянно совершенствовал методику преподавания, подготовил ряд специалистов-гидравликов, которые стали известными российскими и зарубежными учеными.

А.Д. Альтшулем предложена универсальная формула для расчета коэффициента гидравлического сопротивления, доказана универсальность степенного распределения скоростей в потоке. Дополнительное теоретическое обоснование универсальности степенного профиля скорости было дано сотрудником кафедры к.т.н. В.Н. Спиридоновым.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных под руководством А.Д. Альтшуля, составили основу нормативного документа по гидравлическому расчету водоводов, в создании которого принимали участие инженер Э.Н. Полякова и профессор, д.т.н. В.В. Казеннов, работающий на кафедре с 1971 г., которым выполнены также исследования отводящих трактов гидротурбин и получены решения ряда газодинамических задач для различных начальных и граничных условий.

С 1971 по 1975 гг. кафедрой заведовал профессор, д.т.н. Елисей Дмитриевич Мальцев.

**Мальцев Елисей Дмитриевич** (1914-1976 гг.) - крупный специалист в области теплообмена. Руководитель разработок по опреснению соленых вод с использованием жидких гидрофобных теплоносителей и тепловой энергии атомных станций, крупный организатор предприятий по добыче радиоактивного сырья для АЭС с использованием гидравлических методов. Автор учебника по гидравлике пожаротушения.

Под руководством профессора, д.т.н. Е. Д. Мальцева получили развитие исследования по гидравлике и теплообменным процессам при опреснении соленых вод с использованием гидрофобных теплоносителей и тепла атомных электростанций.

С 1976 по 1997 гг. кафедру возглавлял профессор, д.т.н. А.В. Мишуев. С его приходом получило дальнейшее развитие направление, связанное с исследованием нестационарных водных потоков и гидродинамических явлений, это позволило обогатить гидравлику нестационарных течений достижениями газовой динамики и упрочить многие положения последней фундаментальными гидравлическими экспериментальными данными.

А.В. Мишуев известен как видный ученый в области волновой газогидродинамических и нестационарных движений жидкости

в открытых руслах. Им выполнены теоретические исследования форм свободной поверхности при частичном разрушении плотины, взаимодействии длинно прерывной волны с зауженным сечением в открытом канале и др.; решены задачи о газодинамике течений, возникающих при горении газозвудушных смесей, ускорении турбулентного горения и другие задачи, важные для обеспечения взрывобезопасности производств.

Научные труды и разработки профессора А.В. Мишуева отличаются большой практической направленностью, имеют высокий уровень внедрения на промышленных предприятиях. Под его руководством создана уникальная установка газогидравлической аналогии, поставлен цикл лабораторных работ, создана лаборатория газодинамики горения и взрыва.

С 1997 г. по 2007 г. кафедру возглавлял профессор, д.т.н. Валерий Степанович Боровков. Им выполнен большой объем экспериментальных исследований турбулентности высокоскоростных открытых потоков. В статистическом анализе данных впервые была широко использована компьютерная технология, специально разработанная регистрирующая аппаратура, позволяющая установить масштабы и спектры турбулентности, установить закономерности развития турбулентного пограничного слоя в ускоряющихся потоках с переменной глубиной. Результаты исследований обобщены в монографии «Высокоскоростные потоки», которая получила статус учебного пособия для студентов гидротехнических специальностей.

Нарастающая опасность кризисных экономических ситуаций в водном хозяйстве привела к созданию при кафедре научно-исследовательской гидроэкологической лаборатории, коллектив которой под руководством профессора, д.т.н. В.С. Боровкова выполнил большой комплекс экспедиционных исследований на реках Центрального региона России: Верхней Волге, Оке, Суре, Клязьме и многих других. В комплексе изучалось экологическое состояние рек, качество воды, состояние речных русел, процессы дисперсии примесей в речных потоках, распределение скоростей и турбулентность, а также температурный и кислородный режимы, определяющие ход самоочистительных процессов. Новые направления научной деятельности кафедры и полученные результаты активно внедряются в новые формы учебного процесса с использованием компьютерных технологий. На кафедре свыше 250 аспирантов защитили кандидатские диссертации и в том числе автор настоящего учебного пособия к.т.н. С.Ш. Сайридинов. Научные исследования С.Ш. Сайридинова

были выполнены на установке газогидравлической аналогии кафедры под руководством профессора, д.т.н. А.В. Мишуева. Проведенные исследования дали конкретные результаты по определению параметров длинных волн перемещения в каналах с разными формами сжатия. На кафедре защитили докторские диссертации А.П. Юфин, О.Ф. Васильев, А.К. Ананян, А.Д. Альгшуль, В.С. Боровков, В.К. Тарасов, В.В. Казенов, В.Ю. Ляпин. Избраны членами различных академий О.Ф. Васильев, А.В. Мишуев, В.С. Боровков и др.

С 2007 года кафедру возглавляет кандидат технических наук, профессор Зуйков Андрей Львович.

Автор желает огромных творческих успехов ученым кафедры гидравлики МГСУ в деле решения проблемы современной инженерной гидравлики.



# Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

## 1.1. Основные понятия и определения

**Определение жидкости.** Жидкостью называется вещество (промежуточное между твердым и газообразным), находящееся в конденсированном агрегатном состоянии и обладающее способностью легко изменять свою форму под действием весьма незначительных сил. Жидкости, подобно твердым телам, обладают малой сжимаемостью и большой плотностью, но в то же время, подобно газам, не обладают упругостью формы. Наиболее характерным свойством жидкости является текучесть.

**Текучесть** – это легкоподвижность частиц жидкости, обусловленная ее неспособностью воспринимать касательные напряжения в состоянии покоя. Поэтому жидкость не может сохранять собственную форму, а принимает форму сосуда (резервуара, водоема), в котором находится.

Жидкость, как и всякое физическое тело, состоит из отдельных частиц – молекул, объем пустот между которыми во много раз превосходит объем самих молекул. Однако в механике жидкости и газа предполагается, что масса жидкости распределена по объему непрерывно, т.е. рассматривается как сплошная среда (континуум).

Жидкость с точки зрения механических свойств разделяют на два класса: **малосжимаемые (капельные)** и **сжимаемые** (газообразные).

**Капельные жидкости** обладают объемом, который практически не изменяется под действием сил, поэтому в малых количествах они принимают сферическую форму, а в больших обычно образуют свободную поверхность.

**Газы** способны к весьма значительному уменьшению своего объема под действием давления и неограниченному расширению при его отсутствии. Таким образом, капельные жидкости легко изменяют форму (в отличие от твердых тел), но с трудом изменяют объем (в отличие от газов), а газы легко изменяют как объем, так и форму (в некоторых случаях, например при расчете газопровода низкого давления, газы также относят к капельным жидкостям).

## 1.2. Основные физические свойства жидкостей и газов.

### Газовые законы

Основной механической характеристикой жидкости является **плотность**  $\rho$ , определяемая для однородной жидкости отношением ее массы  $m$  к занимаемому объему  $V$ , кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1.1)$$

Плотность однородной жидкости одинакова во всех точках.

Плотность неоднородной жидкости в некоторой точке  $A$  объема определяется соотношением

$$\rho_A = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}, \quad (1.1')$$

где  $\Delta m$  - масса жидкости в объеме  $\Delta V$ ;  $\Delta V$  - элементарный объем, содержащий точку  $A$ .

В практических задачах о массе жидкости судят и по ее весу.

Вес жидкости, приходящийся на единицу объема, называется **удельным весом**  $\gamma$ , Н/м<sup>3</sup> и определяется по формуле

$$\gamma = \frac{G}{V}, \quad (1.2)$$

где  $G$  – вес жидкости в объеме  $V$ .

Удельный вес – величина размерная и измеряется в системе СИ в ньютонах на кубический метр - Н/м<sup>3</sup>. Например, для воды при температуре  $t = +4^\circ\text{C}$   $\gamma = 9810 \frac{\text{H}}{\text{M}^3} \approx 10^4 \text{ Н/м}^3$ .

**Между плотностью и удельным весом существует связь** (между весом тела  $G$ , его массой  $m$  и ускорением свободного падения  $g$  имеется зависимость  $G = mg$ ), которую можно представить в виде

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{G}{gV} = \frac{\gamma}{g}. \quad (1.3)$$

Плотность в системе СИ измеряется в килограммах на кубический метр (кг/м<sup>3</sup>). Так, для воды при температуре  $+4^\circ\text{C}$  имеем  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ . В табл. П.1.1 приведены значения удельного веса и плотности некоторых жидкостей.

**Удельный объем**  $\upsilon$ , т.е. объем единицы массы вещества газа – величина, обратная плотности:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}. \quad (1.4)$$

**Относительным удельным весом жидкости** или относительным весом, называется отношение удельного веса данной жидкости к удельному весу воды при температуре +4°C:

$$\delta = \frac{\gamma_{ж}}{\gamma_{\text{воды}(t=+4^{\circ}\text{C})}}. \quad (1.5)$$

Величина  $\delta$  безразмерная и используется как сравнительная. Численное значение  $\delta$  не зависит от выбранной системы единиц измерения. Так, для пресной воды при температуре +4°C  $\delta=1,0$ ; для морской

воды  $\delta_{\text{м.в}} = \frac{\gamma_{\text{м.в}}}{1000} = \frac{1025}{1000} = 1,025$ ; для бензола  $\delta_{\text{б}} = \frac{878,8}{1000} = 0,878$ .

Из рассмотренных примеров следует, что удельный вес морской воды на 2,5% выше, а у бензола на 12% ниже, чем у пресной воды.

**Относительная плотность газа S** (по воздуху) определяется отношением плотности газа к плотности воздуха при нормальных условиях:

$$S = \frac{\rho}{\rho_{\text{в}}} = \frac{\rho}{1,293} = 0,733 \rho. \quad (1.6)$$

Плотность, а следовательно, удельный вес и относительный удельный вес жидкости меняется с изменением давления и температуры, причем эта зависимость существенно различна для капельных жидкостей и газов.

Так, удельный вес ртути можно вычислить по формуле

$$\gamma = \frac{13595,5}{1 + 0,0001815t}. \quad (1.7)$$

**Давление газа P**, Н/м<sup>2</sup>, обусловлено суммой сил ударов беспорядочно движущихся молекул газа о стенку сосуда, занятого этим газом, и численно равно величине нормальной составляющей, действующей на единицу поверхности, с которой соприкасается газ:

$$P = \frac{F}{f}, \quad (1.8)$$

где F – нормальная составляющая сила; f – площадь, на которую действует сила.

Воздух земной атмосферы своей массой оказывает на поверхность Земли и окружающие предметы давление, называемое атмосферным или барометрическим. Величина его в значительной мере

зависит от высоты места измерения и температуры. На уровне моря при температуре 0°C барометрическое давление равно 760 мм рт.ст. Такое давление называют нормальным атмосферным давлением.

**Закон Бойля-Мариотта** устанавливает зависимость между давлением и объемом данной массы газа при постоянной температуре:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}, \quad \text{или} \quad P_1 V_1 = P_2 V_2 = \text{const}, \quad (1.9)$$

т.е. при неизменной температуре произведение давления газа на его объем есть величина постоянная.

Относя зависимость (1.9) к удельному объему газа  $\nu$ , которой обратно пропорциональна его плотность  $\rho$ , получаем

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{\nu_2}{\nu_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad (1.10)$$

т.е. при неизменной температуре удельный объем обратно пропорционален, а плотность прямо пропорциональна абсолютному давлению, под которым находится газ.

**Закон Авогадро** устанавливает, что равные объемы разных газов при одинаковых температуре и давлении содержат одинаковое число молекул. Для одной грамм-молекулы это число составляет  $6,06 \cdot 10^{23}$  и называется числом Авогадро. При нормальных условиях объемы одной грамм-молекулы различных газов одинаковы и примерно равны 22,4 л. Соответственно, объем одной килограмм-молекулы газа, часто называемый киломолем, равен 22,4 м<sup>3</sup>. Зная молекулярную массу газа  $M$ , можно определить его плотность по формуле

$$\rho = \frac{M}{22,4}. \quad (1.11)$$

Уравнение состояния идеального газа объединяет **законы Бойля-Мариотта и Гей-Люссака** и связывает между собой основные параметры газа – давление, температуру и удельный объем. Для 1 кг газа это уравнение выведено Клайпероном в следующем виде:

$$P\nu = RT, \quad (1.12)$$

где  $P$  – давление газа, кгс/см<sup>2</sup>;  $\nu$  – удельный объем газа, м<sup>3</sup>/кг;  $T$  – абсолютная температура, К;  $R$  – газовая постоянная.

Поскольку удельный объем газа

$$\nu = \frac{V}{m}, \quad (1.13)$$

уравнение (1.12) для любого количества газа  $m$ , кг, принимает вид

$$PV = mRT. \quad (1.14)$$

Д.И. Менделеев составил это уравнение применительно к 1 киломолю идеального газа

$$PV_M = MRT, \quad (1.15)$$

где  $V_M$  – объем 1 киломоля газа,  $m^3$ ;  $M$  – молярная масса, кг.

Произведение  $MR = \bar{R}$  называют **универсальной газовой постоянной**. Величина и размерность универсальной газовой постоянной зависят от того, в каких единицах выражены давление и объем газа. В технической системе единиц при  $P=10330$  кгс/м<sup>2</sup>,  $V_M=22,4$  м<sup>3</sup> и  $T = 273,15$  К

$$\bar{R} = PV_M/T = 10330 \cdot 22,4/273,15 = 848 \text{ кгс} \cdot \text{м}/(\text{кмоль} \cdot \text{град}).$$

Газовая постоянная определяет работу, совершаемую одним килограммом или одним киломолем газа при нагревании на 1°С при неизменном давлении. Если величину универсальной газовой постоянной разделить на молекулярную массу какого-либо идеального газа, получим значение удельной газовой постоянной этого газа. Значение удельных газовых постоянных некоторых газов приведены в табл. П.1.2; плотности – в табл. П.1.3.

Ко многим применяемым в технике газам (кислороду, азоту, воздуху, окиси и двуокиси углерода, газообразным продуктам сгорания топлива и т.п.) в определенном диапазоне температур и давлений (далеких от сжижения) можно без существенных погрешностей применять законы, справедливые для идеальных газов.

Плотность воздуха в стандартных условиях ( $t = 20^\circ\text{C}$ ;  $P = 101325$  Па;  $R = 287$  Дж/кг·К) можно определить из уравнения состояния газа:

$$\rho_0 = \frac{101325}{287 \cdot (273 + 20)} = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Плотность воздуха при других условиях определяется по формуле

$$\rho = \rho_0 \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T}. \quad (1.16)$$

Для адиабатического процесса справедливо

$$\frac{P}{\rho^K} = \text{const}, \quad (1.17)$$

где  $K = \frac{C_p}{C_v}$  – показатель адиабаты;  $C_p$  – массовая теплоемкость при

неизменном давлении, кДж/(кг·град);  $C_v$  - массовая теплоемкость при неизменном объеме, кДж/(кг·град).

Изложенные газовые законы в полной мере справедливы лишь для идеального газа. Поведение же реальных газов несколько отклоняется от этих законов, причем отклонение тем больше, чем выше давление газов и ниже их температура. Коэффициент, учитывающий эти отклонения, называют коэффициентом сжимаемости и обозначают буквой  $Z$ . С учетом коэффициента уравнение (1.12) приобретает вид

$$pV = ZRT. \quad (1.18)$$

При давлениях 8-10 кгс/см<sup>2</sup> отклонения от законов газового состояния невелики и практически могут не приниматься во внимание. При более высоких давлениях, например при расчете транспортировки газа по магистральным газопроводам, коэффициент сжимаемости газа необходимо учитывать.

**Закон Дальтона** устанавливает, что давление смеси идеальных газов равно сумме давлений отдельных газов, образующих смесь, т.е. парциальных давлений. **Парциальным давлением** называют давление, которое имеет входящий в состав смеси отдельный газ в объеме смеси и при температуре смеси:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n, \quad (1.19)$$

где  $P$  – общее давление смеси;  $P_1, P_2, \dots, P_n$  – парциальные давления компонентов смеси.

Парциальное давление каждого компонента смеси определяется по его объемному (или молярному) содержанию в смеси:

$$P_1 = r_1 P; \quad P_2 = r_2 P; \quad \dots; \quad P_n = r_n P. \quad (1.20)$$

Иначе говоря, каждый компонент, занимая общий объем всей смеси, имеет давление, соответствующее его доле в газовой смеси.

Средняя плотность смеси идеальных газов

$$\rho_{см} = r_1 \rho_1 + r_2 \rho_2 + \dots + r_n \rho_n, \quad (1.21)$$

где  $r_1, r_2, \dots, r_n$  - объемное (или молярное) содержание каждого компонента смеси в долях единицы;  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ , - плотность компонентов смеси.

**Закон Рауля** устанавливает, что парциальное давление пара каждого компонента жидкой смеси равно упругости паров его в чистом виде при данной температуре, умноженной на объемную (или молярную) долю этого компонента в жидкой фазе:

$$P_i = r_i P_i^1, \quad (1.22)$$

где  $P_i$  - парциальное давление паров компонента  $i$  в смеси;  $P_i^l$  - упругость паров чистого компонента  $i$ ;  $r_i$  - объемная (или молярная) доля компонента  $i$  в жидкой фазе.

Если известен объемный (или молярный) состав жидкой смеси в долях единицы, то средняя плотность смеси

$$\rho'_{см} = r'_1 \rho'_1 + r'_2 \rho'_2 + \dots + r'_n \rho'_n, \quad (1.23)$$

где  $r'_1, r'_2, \dots, r'_n$  - объемное (или молярное) содержание каждого компонента смеси в долях единицы;  $\rho'_1, \rho'_2, \dots, \rho'_n$  - плотности компонентов, входящих в смесь.

Свойства жидкостей зависят от особенностей молекулярного строения. Некоторые свойства могут быть изучены и без проникновения в детали молекулярного строения. Для этого можно воспользоваться средними для массы жидкости характеристиками молекулярного движения, например характеристиками, определяющими среднюю кинетическую энергию молекул. Такими характеристиками являются термодинамические параметры состояния – температура и давление.

**Испарение** представляет собой процесс перехода в газообразное состояние. Этот процесс обусловлен прорывом молекул жидкости сквозь свободную поверхность и распространением их в окружающем пространстве. Если объем этого пространства достаточно велик, испарение продолжается до исчезновения жидкости, хотя часть испарившихся молекул возвращается в жидкость – конденсируется. Если объем недостаточно велик, испарение продолжается до наступления динамического равновесия, когда число конденсирующихся за некоторое время молекул выравнивается. При этом в окружающем пространстве устанавливается давление, называемое давлением насыщенного пара или упругостью насыщенного пара. Величина этого давления зависит от температуры.

**Растворение газов в жидкостях** представляет собой процесс проникновения молекул газа из окружающей среды через свободную поверхность внутрь жидкости. Количество растворенных в жидкости газов может увеличиваться с течением времени, несмотря на то, что часть молекул газа из жидкости возвращается в окружающую среду. Процесс растворения продолжается до насыщения жидкости газом, т.е. до такого состояния, при котором количество растворяющегося и количество выделяющегося за некоторое время газа оказываются равными.

**Объем газа**, который может раствориться при данной температуре в данном объеме жидкости до ее насыщения, пропорционален давлению на свободной поверхности жидкости (**закон Генри**):

$$V_{\text{го}} = KV_{\text{ж}} \frac{P}{P_0}, \quad (1.24)$$

где  $V_{\text{го}}$  - объем растворенного при давлении  $P$  газа, отнесенный для сопротивления объемов к эталонному давлению  $P_0$ ;  $K$  – коэффициент растворимости;  $V_{\text{ж}}$  - объем жидкости;  $P$  – давление на свободной поверхности.

Величина коэффициента растворимости зависит от химического состава жидкости и газа и их температуры.

Время насыщения жидкости газом зависит от площади и состояния свободной поверхности. Возмущение поверхности ускоряет процесс растворения газов.

При понижении давления на поверхности жидкости газ выделяется до тех пор, пока его объем в жидкости не придет в соответствие с новой величиной давления. При выделении газа жидкость вспенивается.

**Кипение** – процесс образования и роста пузырьков пара внутри жидкости с последующим прорывом этих пузырьков сквозь свободную поверхность в окружающую среду.

При рассмотрении процесса кипения следует иметь в виду, что технические жидкости всегда содержат пузырьки нерастворенных газов. Поверхность этих пузырьков представляет собой свободную поверхность, через которую внутрь пузырьков испаряется жидкость до состояния насыщения. Давление внутри пузырька практически равно давлению насыщенного пара.

Если внешнее давление превышает давление насыщенного пара, размер пузырьков уменьшается, действующая на него подъемная сила со стороны жидкости также уменьшается и оказывается недостаточной для преодоления сопротивления среды и выталкивания пузырьков из жидкости.

Если же давление на поверхности жидкости меньше давления насыщенного пара, внешнее давление на пузырек оказывается меньше внутреннего, пузырек увеличивается, всплывает к поверхности и прорывается сквозь нее в окружающую среду. Происходит кипение жидкости.



## Содержание

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
ВВЕДЕНИЕ .....	4
Глава 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ.....	16
1.1. Основные понятия и определения .....	16
1.2. Основные физические свойства жидкостей и газов. Газовые законы .....	17
Примеры расчетов .....	34
Глава 2. ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАВНОВЕСНОГО СОСТОЯНИЯ ЖИДКОСТЕЙ (ГИДРОСТАТИКА).....	38
2.1. Силы, действующие в покоящейся жидкости.....	38
2.2. Гидростатическое давление в точке.....	41
2.3. Свойство гидростатического давления.....	42
2.4. Дифференциальные уравнения равновесия жидкости (уравнения Эйлера).....	45
2.5. Поверхность уровня.....	49
2.6. Равновесие несжимаемой жидкости в поле земного тяготения.....	49
2.7. Закон Паскаля.....	54
2.8. Равновесие несмешивающихся жидкостей.....	54
2.9. Относительное равновесие.....	55
2.10. Давление жидкости на плоские стенки. Сила давления жидкости на стенку.....	64
2.11. Давление жидкости на криволинейные поверхности.....	71
2.12. Эпюры давлений.....	76
2.13. Закон Архимеда.....	80
2.14. Равновесие газов. Основные уравнения и поверхность уровня.....	84
Примеры расчетов .....	89
Глава 3. ОСНОВЫ КИНЕМАТИКИ И ДИНАМИКИ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ.....	103
3.1. Основные понятия о движении жидкости .....	103
3.2. Элементарная струйка и ее расход.....	105
3.3. Основные уравнения кинематики и динамики невязкой жидкости.....	111
3.4. Движение вязкой жидкости. Уравнение Навье-Стокса.....	144
3.5. Уравнение Бернулли для реальной жидкости.....	148
3.6. Уравнение Бернулли для элементарной струйки невязкой сжимаемой жидкости.....	156
3.7. Уравнение импульсов.....	160
Примеры расчетов .....	164
Глава 4. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ.....	170
4.1. Физические характеристики гидравлических сопротивлений.....	170
4.2. Основное уравнение равномерного движения.....	172
4.3. Основной закон вязкостного сопротивления.....	178

4.4. Режимы движения жидкости.....	179
4.5. Гидравлически гладкие и шероховатые трубы.....	205
4.6. Местные сопротивления и потери напора.....	215
Примеры расчетов .....	230
<b>Глава 5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ И ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ.....</b>	
5.1. Расчет коротких трубопроводов.....	240
5.2. Расчет длинных трубопроводов.....	246
Примеры расчетов .....	256
<b>Глава 6. ИСТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ИЗ ОТВЕРСТИЙ И НАСАДКОВ.....</b>	
6.1. Истечение через малое отверстие в тонкой стенке.....	266
6.2. Полное совершенное и неполное несовершенное сжатие.....	271
6.3. Истечение через затопленные отверстия.....	272
6.4. Истечение через большие отверстия в атмосферу.....	273
6.5. Истечение через затопленное большое отверстие.....	275
6.6. Истечение через насадки.....	276
6.7. Уравнение баланса воды в резервуаре.....	279
6.8. Истечение при переменном напоре.....	280
Примеры расчетов .....	286
<b>Глава 7. ПОДОБИЕ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....</b>	
7.1. Общие принципы подобия физических явлений.....	295
7.2. Условия подобия гидродинамических явлений.....	296
7.3. Теорема подобия и подобное преобразование дифференциальных уравнений.....	299
7.4. Подобие преобразования уравнений Навье-Стокса. Основные критерии гидродинамического подобия.....	305
7.5. Автомодельность.....	311
7.6. Основные принципы метода анализа размерностей.....	312
7.7. Примеры применения условия подобия при решении гидродинамических задач.....	315
Приложение 1.....	319
Приложение 2.....	324
Приложение 3.....	328
Приложение 4.....	337
Приложение 5.....	340
Приложение 6.....	348
Литература.....	349

Учебное пособие

**Сайриддин Шахобович Сайридинов**

# **ГИДРАВЛИКА СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ**

Компьютерный набор и верстка: *Л.В. Сызганцевой*

Редактор: *Н.А. Фомичева*

Дизайн обложки: *Н.С. Романова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98.

Подписано к печати 12.10.11. Формат 60х90/16.

Бумага офс. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. 22 п.л. Тираж 500 экз. Заказ №

ООО «Издательство АСВ»

129337, Москва, Ярославское шоссе, 26. Отдел реализации – оф. 511

тел., факс (499)183-56-83, e-mail: [iasv@mgsu.ru](mailto:iasv@mgsu.ru)

Internet: [www.iasv.ru](http://www.iasv.ru)