

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

А. А. Макаревич

ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

*Рекомендовано
Учебно-методическим объединением
по естественнонаучному образованию
в качестве учебно-методического пособия для студентов
учреждений высшего образования, обучающихся по специальности
1-31 02 02 «Гидрометеорология»*

МИНСК
БГУ
2017

УДК 626/627:532.5(075.8)

Р е ц е н з е н т ы :

кандидат технических наук, доцент *В. Е. Левкевич*;
кандидат географических наук, доцент *И. С. Пармасёнок*

Макаревич, А. А.

Гидравлика и инженерная гидрология [Электронный ресурс] : учеб.-метод. пособие / А. А. Макаревич. — Минск : БГУ, 2017.

ISBN 978-985-566-419-3.

Даны рекомендации по использованию республиканских нормативных документов для проведения инженерно-гидрологических исследований и проектирования. Приведены необходимые сведения, формулы, таблицы, литература.

Для студентов учреждений высшего образования, обучающихся по специальности 1-31 02 02 «Гидрометеорология».

УДК 626/627:532.5(075.8)

ISBN 978-985-566-419-3

© Макаревич А. А., 2017
© БГУ, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	6
------------------	---

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДИСЦИПЛИНЕ «ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ»

1.1. Предмет и задачи дисциплины	7
1.2. История развития гидравлики и инженерной гидрологии.....	8
1.3. Методы исследований	17

2. ГИДРАВЛИКА

2.1. Физические свойства воды	20
2.2. Гидростатика	25
2.2.1. Гидростатическое давление и его свойства	25
2.2.2. Основное уравнение гидростатики. Закон Паскаля	26
2.2.3. Пьезометрическая высота. Пьезометры открытого и закрытого типов	28
2.2.4. Вакуум и вакуумметрическое давление. Вакуумметры	30
2.2.5. Суммарное гидростатическое давление на плоские поверхности	32
2.2.6. Равновесие плавающих тел. Закон Архимеда	35
2.2.7. Статическая остойчивость плавающего судна и ее условия	37
2.3. Гидродинамика	38
2.3.1. Гидравлические параметры потока	38
2.3.2. Виды движения воды. Уравнение неразрывности потока	39
2.3.3. Кривые свободной поверхности потока	41
2.3.4. Два режима движения воды: ламинарное и турбулентное. Число Рейнольдса	42
2.3.5. Закон Ньютона о внутреннем трении в жидкости	44
2.4. Движение воды в открытых руслах (потоках)	44
2.4.1. Силы, действующие на движение потоков. Формула Шези.....	44

2.4.2. Распределение скоростей течения в речном потоке. Турбулентные пульсации.....	49
2.4.3. Кривая расходов воды. Закономерности трансформации паводков...	51
2.4.4. Поперечное равновесие потока. Центробежная сила. Сила Кориолиса.....	53
2.4.5. Виды потоков по состоянию водной поверхности. Число Фруда. Гидравлический прыжок	57
2.5. Водосливы.....	60
2.5.1. Определение и классификация водосливов	60
2.5.2. Водослив как гидрометрическое устройство	61
2.5.3. Сопряжение бьефов и сопрягающие сооружения.....	64

3. ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

3.1. Практическое значение инженерной гидрологии	66
3.2. Основные принципы гидрологических расчетов.....	67
3.2.1. Понятие и назначение гидрологических расчетов.....	67
3.2.2. Расчеты стока при наличии данных наблюдений. Кривая обеспеченности.....	69
3.2.3. Расчеты стока при недостаточности данных наблюдений.....	76
3.2.4. Расчеты стока при отсутствии данных наблюдений	82
3.3. Гидротехнические сооружения	85
3.3.1. Общие сведения о гидротехнических сооружениях и их классификация.....	85
3.3.2. Классификация рек и каналов Беларуси	87
3.3.3. Водоподпорные плотины. Проектные характеристики водохранилища	89
3.3.4. Основные сооружения при земляной плотине.....	90
3.3.5. Порядок перекрытия русла реки при строительстве гидроузла.....	92
3.3.6. Стадии проектирования и строительства ГТС. Методы проектирования	93
3.4. Экспедиционные гидрологические исследования.....	95
3.4.1. Классификация водных исследований.....	95
3.4.2. Этапы и состав работ	96
3.4.3. Гидрологические работы в составе экспедиционных исследований ...	97
3.5. Нормативные документы и технические кодексы	100

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	105
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.	107
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.	112
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.	113
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.	114

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дисциплина «Гидравлика и инженерная гидрология» изучается в объеме, достаточном для подготовки специалистов-гидрометеорологов (аудиторные занятия – 70 ч, из которых лекций – 44 ч, лабораторно-практические и семинарские занятия – 26 ч).

При отборе материала для учебно-методического пособия был использован многолетний опыт, накопленный в области теории и практики гидравлических и инженерно-гидрологических исследований научно-исследовательскими институтами (в работе которых автор принимал непосредственное участие), а также опыт проектных водохозяйственных организаций, профильных высших учебных заведений Республики Беларусь, Российской Федерации и других стран ближнего зарубежья.

В издании даются рекомендации по использованию республиканских нормативных документов для проведения инженерно-гидрологических исследований и проектирования. Приведены необходимые сведения, формулы, таблицы, литература. Вопросы гидравлики излагаются с учетом особенностей речных потоков, что делает содержание более конкретным и близким к профилю географов-гидрометеорологов, занимающихся естественными водными потоками. Специальные вопросы технической гидравлики и гидродинамики в задачи дисциплины не входят.

Изложение многих инженерных проблем носит описательный характер, а приводимый иллюстративный материал сознательно предельно схематизирован. Это позволяет сделать материал доступным для самостоятельного изучения студентами.

По тематике и объему содержание учебно-методического пособия согласуется с аналогичными учебными изданиями, разработанными на географических факультетах университетов, в частности Российской Федерации, и отличается результатами новейших исследований и методами инженерно-гидрологических исследований и расчетов для условий Республики Беларусь.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ДИСЦИПЛИНЕ «ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ»

1.1. ПРЕДМЕТ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Вода имеет исключительное значение для всех природных процессов. Кроме того, она играет большую роль в практической деятельности человека. Водные ресурсы Беларуси широко используются в народном хозяйстве. Это обеспечение населенных пунктов и промышленных предприятий водой, использование энергии воды, развитие водного транспорта, орошение земель, мелиорация и т. д. Рациональный подход в сфере водных ресурсов республики требует обоснованного проектирования гидротехнических и других сооружений на водных объектах.

В связи с этим при подготовке специалистов-гидрометеорологов изучаемая *комплексная дисциплина* имеет особое значение. Она состоит из двух взаимосвязанных разделов: гидравлики и инженерной гидрологии.

Гидравлика изучает законы равновесия и движения жидкостей и служит теоретической основой для решения практических задач инженерной гидрологии.

Гидравлика подразделяется на две части: *гидростатику* и *гидродинамику*.

Инженерная гидрология – совокупность областей гидрологии суши, связанных с практическим применением результатов гидрологических исследований при решении инженерных и водохозяйственных задач.

Цель изучения дисциплины «Гидравлика и инженерная гидрология» – сформировать у студентов необходимые знания и навыки для решения вопросов проектирования объектов водохозяйственного и гидротехнического строительства в Республике Беларусь, комплексного использования и охраны водных ресурсов республики.

В задачи дисциплины входят:

- изучение основ гидростатики, гидродинамики и закономерностей движения воды в открытых потоках (реках, каналах, ручьях);
- усвоение комплекса методов инженерно-гидрологических изысканий, необходимых в практике водохозяйственного и гидротехнического проектирования, комплексного использования и охраны водных ресурсов;

- приобретение практических навыков инженерно-гидрологических расчетов и обобщений, использования нормативной документации и справочных изданий;

- ознакомление со спецификой проведения инженерно-гидрологических исследований и изысканий в Республике Беларусь.

В дисциплине упор сделан на изучение гидравлики и ее приложений к гидрологии открытых потоков – рек, каналов и ручьев, в ее основе – неразрывная взаимосвязь речной гидравлики с инженерной гидрологией.

Приобретенные знания и практические навыки будут способствовать более глубокому изучению и смежных дисциплин гидрологического цикла, таких как «Гидрологические прогнозы», «Речной сток и русловые процессы», «Гидрометрия и водохозяйственный баланс», «Гидрологические расчеты» и др.

1.2. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ГИДРАВЛИКИ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОЛОГИИ

Развитие человеческого общества неразрывно связано с использованием воды. Еще в первобытное время реки, озера и моря являлись местами поселения человека. Они удовлетворяли его потребности в воде и пище, служили естественными путями сообщения. Через реки и моря шло распространение человеческой цивилизации по земному шару. Почти все крупнейшие города мира (в том числе многие столицы государств) расположены на реках, в устьях, на побережьях морей.

Орошаемое земледелие и современная цивилизация в целом зародились в низовьях и дельтах великих рек мира, таких как Янцзы, Хуанхэ, Ганг, Инд, Нил, Тигр и Евфрат, Амударья и Сырдарья. Многоводные реки с плодородными речными долинами были центрами древнейших цивилизаций.

История развития гидравлики и инженерной гидрологии тесно связана с историей развития торговли, сельского хозяйства, промышленности, науки и техники, с использованием водных объектов и ресурсов в практических целях. В ней можно выделить пять этапов [4, 6, 9, 10].

Первый этап – с древнейших времен до XV в. Практические знания основ гидравлики были известны людям еще за 4 тыс. лет до н. э. Народы Древнего Египта, Китая, Ассирии, Вавилонии, Индии, а позже – Древней Греции, Древнего Рима, государств Средней Азии и Закавказья строили корабли для плавания по рекам и морям, сооружали

плотины на реках, создавали каналы для орошения полей, водопроводы и акведуки для водоснабжения населенных пунктов.

Однако реки были и источниками неисчислимых бедствий. Обвалование территорий для борьбы с затоплением имело место на землях современной Голландии за 2 тыс. лет до н. э. Жизнь человека вблизи воды во многом зависела от режима водных объектов. Человек вынужден был следить за этим режимом, вести наблюдения.

Считается, что зарождение гидрологии относится к периоду 3,5–3 тыс. лет до н. э. Это связано с организацией наблюдений за уровнями воды одной из крупнейших рек мира – Нила, на которой сохранились первые гидрометрические сооружения – водомерные посты («ниломеры»); всего их насчитывалось около 30. В Европе и Америке еще в XIX в. водомерные рейки и приборы для автоматической записи уровней воды называли ниломерами.

Из известных дошедших до нас научных трудов по гидравлике первым был трактат древнегреческого математика и механика **Архимеда** (ок. 287–212 гг. до н. э.) «О плавающих телах» (250 г. до н. э.), в котором содержались основные понятия гидростатики, закон о выталкивающей силе жидкости, основы теории плавания тел.

В Древнем Риме инженер-строитель **Секст Юлий Фронтин** (40–103 гг. н. э.) в работе «О водопроводах Рима» (93 г. н. э.) решает задачи о течении жидкости в каналах и трубах, об истечении ее из сосудов через отверстия и насадки. Позже в своих работах он указывает, что во времена императора Траяна (98–117 гг. н. э.) в Риме было девять водопроводов-акведуков (рис. 1.1), общая длина водопроводных линий которых составляла 436 км.



Рис. 1.1. Древнеримский акведук

Римляне уже знали о наличии связи между площадью живого сечения и уклоном дна русла, о сопротивлениях движению воды в трубах и каналах. Не случайно название «гидравлика» произошло от сочетания двух греческих слов: «hydōr» – вода, «aulós» – труба, желоб. Первоначально оно означало учение о движении воды по трубам и каналам.

Период Средневековья (V–XV вв.) после падения Римской империи в 476 г. характеризуется регрессом, в том числе в области гидравлики и инженерной гидрологии. Гидротехнические сооружения приходили в негодность, большая часть опыта римских инженеров была утеряна. Несмотря на это в феодальный период развитие торговли и ремесел потребовало улучшения путей сообщения и использования энергии воды.

В Киевской Руси водяные мельницы были известны с IX–X вв. В XI–XII вв. в Новгороде существовал водопровод из деревянных труб. В XIII–XIV вв. в Западной Европе появляются более совершенные водяные мельницы, строятся каналы и шлюзы.

Второй этап – XV в. – 70-е гг. XVII в. Этот этап совпал с эпохой Возрождения и характеризуется возобновлением научных исследований, в том числе по гидравлике. К их числу относятся работы **Леонардо да Винчи** (1452–1519), которые сохранились в 7 тыс. страниц рукописей, находящихся сегодня в библиотеках Лондона, Виндзора, Парижа, Милана и Турина. Среди них выделяются записки «О движении и измерении воды» (конец XV в.), которые были обнаружены и опубликованы лишь в XX в. Леонардо да Винчи, первым описавший свои наблюдения за динамикой водного потока, справедливо считается основоположником речной гидравлики. Он строил плотины, судоходные и оросительные каналы, шлюзы, портовые сооружения.

Позднее великий итальянский физик, механик и астроном **Г. Галилей** (1564–1642) опубликовал трактат о законах плавания, доказал существование вакуума. Ученик Галилея **Э. Торричелли** (1608–1647) – выдающийся итальянский математик и физик – продолжил исследования. Он открыл существование атмосферного давления и вакуума (торричеллиева пустота), изобрел ртутный барометр.

Выдающийся французский математик и физик **Б. Паскаль** (1623–1662) обосновал известный закон о передаче внешнего давления жидкостью – закон Паскаля (был опубликован в 1663 г., уже после смерти ученого). Б. Паскаль также установил, что атмосферное давление зависит от высоты, влажности и температуры воздуха, а следовательно, барометр Торричелли можно использовать для предсказания погоды.

Третий этап — 70-е гг. XVII в. — конец XIX в. Характеризуется бурным развитием водных путей. Было построено много судоходных каналов во Франции, Германии, Англии, России.

Настоящий прорыв в инженерной гидрологии произошел в 1674 г., который и считается годом ее рождения. Тогда француз **П. Перро** (брат известного сказочника) рассчитал водный баланс р. Сены и доказал, что количество осадков, выпавших на поверхность ее бассейна, превышает объем стока.

В России мощным подъемом промышленности на Урале, Алтае, в Карелии, Забайкалье и центральных частях страны ознаменовалась эпоха Петра I. Царь правильно оценил значение водных путей для России с ее огромными просторами и бездорожьем. Были предприняты большие работы по улучшению судоходных условий на реках, строительству шлюзов и каналов, соединяющих речные бассейны.

В 1703—1722 гг. были соединены р. Ока с верховьями Дона Иванковским каналом, р. Волга с Балтийским морем Вышневолоцкой системой через реки Тверца, Цна, Мста, оз. Ильмень и р. Волхов, в 1732 г. построены Приладожские каналы, сооружены шлюзовой канал между верховьями Оки и Дона, каналы в Петербурге.

В России при Петре I начаты систематические исследования водных объектов. По указу царя в 1715 г. на р. Неве у Петропавловской крепости был устроен первый водомерный пост в России. К концу XVII в. такие посты уже функционировали на Ладожском озере, Северной Двине, Волге. Петр I был организатором первых специальных гидрографических обследований рек, создателем первого закона об охране вод.

В научном плане на этом этапе были заложены основы теоретической гидромеханики. Гениальный английский физик, механик, астроном и математик **И. Ньютон** (1643—1727) сформулировал гипотезу о внутреннем трении в движущейся реальной жидкости, впервые введя понятие о вязкости жидкости, разработал модель идеальной (т. е. невязкой) жидкости.

Немецкий философ, математик и физик **Г. В. Лейбниц** (1646—1716) открыл дифференциальное и интегральное исчисления и тем самым дал сильнейший импульс к ускоренному развитию многих наук, в том числе и гидравлики. По просьбе Петра I он разработал проекты развития образования и государственного управления в России. К середине XVIII в. работы Ньютона и Лейбница получили развитие в трудах трех замечательных ученых — М. В. Ломоносова, Д. Бернулли и Л. Эйлера.

М. В. Ломоносов (1711–1765) открыл и теоретически и экспериментально обосновал всеобщий естественный закон сохранения вещества и энергии, послуживший теоретической основой гидравлики как самостоятельной науки, изложенной в книге «Рассуждения о твердости и жидкости тела».

Д. Бернулли (1700–1782) – выдающийся голландский физик и математик, ученик Лейбница, член Петербургской академии наук, в 1725–1733 гг. жил и работал в Петербурге. Здесь он написал и впоследствии опубликовал в Страсбурге (1738) свой знаменитый труд «Гидродинамика», в котором осветил ряд основополагающих вопросов гидравлики, в частности обосновал уравнение установившегося движения (идеальной жидкости), носящее сегодня его имя.

Л. Эйлер (1707–1783) – великий швейцарский математик, механик и физик, член Петербургской академии наук, жил и работал в Петербурге в 1727–1741 гг. и с 1766 г. до конца жизни. В своем труде «Общие принципы движения жидкости» он подытожил и обобщил в математической форме работы предшествовавших авторов, составил известные дифференциальные уравнения движения и относительно равновесия жидкости, названные его именем.

Исследования Ломоносова, Бернулли и Эйлера способствовали дальнейшему становлению гидравлики, которая стала быстро развиваться как самостоятельная наука. В конце XVIII в. во Франции образовалась школа ученых-инженеров, которые занимались механикой жидкости как технической прикладной наукой. Они ввели ее преподавание в технических учебных заведениях. К ярким представителям французской школы можно отнести следующих ученых и инженеров.

А. Пито (1695–1771) – член Парижской академии наук, изобретатель «трубки Пито» для определения скорости течения воды; в современной авиации его изобретение используется для определения скорости и высоты полета.

А. Шези (1718–1798) – директор французской Национальной школы мостов и дорог, исследовал различные вопросы гидравлики, в частности обосновал формулу для определения средней скорости течения. С его именем связаны изобретения нивелира и эклиметра.

В XIX в. гидравлика особенно быстро развивалась как прикладная инженерная гидрология, удовлетворяющая запросы практики. В ряде учебных заведений западноевропейских стран и в России было начато преподавание механики жидкости (гидравлики), созданы специальные лаборатории, изданы учебники. Развитие практической гидравлики

связано с именами крупных исследователей-экспериментаторов, среди которых отметим следующих.

Д. Б. Вентури (1746–1822) – итальянский профессор. Исследовал истечение жидкости из отверстий и насадков различной формы, изобрел «лоток Вентури» для измерения расхода воды.

Л. М. А. Навье (1785–1836) – видный французский инженер и механик, профессор Национальной школы мостов и дорог, а затем Политехнической школы в Париже, член Парижской академии наук. В 1824 г. первым вывел уравнения движения вязкой жидкости.

А. Дарси (1803–1857) – французский инженер-гидротехник. Ему принадлежит закон движения воды в пористой среде (1856). Он установил зависимость скорости фильтрации от пьезометрического уклона.

У. Фруд (1800–1879) – английский инженер. Ввел в 1870 г. «число Фруда» для определения состояния потока (спокойное или бурное) в зависимости от скорости течения, глубины потока и ускорения свободного падения.

Р. Маннинг (1816–1897) – ирландский инженер-гидротехник. В 1890 г. издал труд «Движение воды в открытых каналах и трубах». В гидравлике и инженерной гидрологии известна формула Маннинга для определения коэффициента Шези.

Д. Г. Стокс (1819–1903) – выдающийся английский физик и математик, автор ряда исследований по математике и гидродинамике. Вывел уравнения движения вязкой жидкости. Получил ряд важных математических результатов.

О. Рейнольдс (1842–1912) – английский физик и инженер, профессор Манчестерского университета, член Лондонского королевского общества. На основании экспериментальных исследований установил наличие ламинарного и турбулентного режимов. В 1883 г. предложил число Рейнольдса как граничный критерий между этими режимами.

Ж. В. Буссинекс (1842–1929) – французский ученый, механик, доктор и профессор Парижского университета, член Парижской академии наук. Изучал турбулентные течения, волны в открытых руслах, гидравлический прыжок, гидравлические сопротивления, фильтрацию. Внес значительный вклад в развитие прикладной гидромеханики.

В XIX в. в Петербургском институте инженеров путей сообщения существовала знаменитая гидравлическая школа, ученые которой в самом начале своей деятельности опирались на достижения французской гидравлической школы.

Профессор **П. П. Мельников** (1804–1880) – почетный член Петербургской академии наук, участник проектирования и строительства первой двухосной железной дороги Петербург – Москва длиной 645 км. П. П. Мельников написал первый учебник по гидравлике «Основания практической гидравлики...» (1836), организовал первую в России учебную гидравлическую лабораторию (1855).

В XIX в. гидрологические исследования в России велись Министерством путей сообщения на крупных судоходных реках и Министерством земледелия на малых реках, сток которых использовался для нужд сельского хозяйства. В конце XIX – начале XX в. существенный вклад в развитие гидравлики внесли русские ученые и инженеры.

Ученый-инженер, почетный член Петербургской академии наук **Н. П. Петров** (1836–1920) теоретически обосновал гипотезу Ньютона о внутреннем трении в жидкости.

Н. Е. Жуковский (1847–1921) – профессор Московского высшего технического училища и Московского университета, член-корреспондент Петербургской академии наук. Создал теорию гидравлического удара. Он явился основателем русской школы гидравлики грунтовых вод.

Таким образом, к концу XIX – началу XX в. гидравлика трудами ученых и инженеров всего мира превратилась в самостоятельную науку. Вместе с тем в ней наметились отдельные научные направления инженерной гидрологии, связанные с запросами самых разных областей техники (расчет каналов, водопроводов, канализации, отверстий плотин, шлюзов, мостов, гидроэлектростанций и т. п.).

Четвертый этап – начало XX в. – 60-е гг. XX в. Характеризуется техническим прогрессом во всех отраслях производства и науки.

После Октябрьской революции в связи с бурным развитием промышленного и гидротехнического строительства в Советской стране был создан целый ряд научно-исследовательских и проектно-испытательских институтов с гидравлическими и гидротехническими лабораториями; появилась обширная литература (журналы, труды институтов, монографии, руководства для проектирования и т. п.), освещающая самые различные стороны гидравлики и инженерной гидрологии.

В 1919 г. в стране был создан центр гидрологических исследований, которым стал Государственный гидрологический институт (ГГИ),

а в 1929 г. была организована гидрометеорологическая служба, благодаря деятельности которой в настоящее время в странах СНГ действует около 40 тыс. пунктов наблюдения за элементами гидрологического режима водных объектов.

В 1920 г. была создана Государственная комиссия по электрификации России (ГОЭЛРО). В 1932 г. пущена ДнепрогЭС (рис. 1.2), а всего за две первые пятилетки введены в эксплуатацию 32 крупные ГЭС. За один год и девять месяцев (1931–1933) был построен Беломорско-Балтийский канал длиной 227 км. В 1932–1937 гг. построен канал имени Москвы длиной 128 км, соединивший реки Волгу и Москву. При этом значительно увеличились площади орошаемых и осушаемых земель. Особенно грандиозные гидротехнические проекты стали осуществляться вскоре после Великой Отечественной войны, примером чего могут служить комплекс сооружений Волго-Донского канала, а также гидроэлектростанции Волжская (мощностью 2,5 млн кВт), Братская (4,5 млн кВт), Красноярская (6 млн кВт), Саяно-Шушенская (6,4 млн кВт) и др.

Проектирование крупных гидроэлектростанций, плотин и водохранилищ на равнинных и горных реках и вызываемые этим подпоры и затопления территории привели к необходимости разработки основ гидравлики открытых русел, в том числе и речной гидравлики. В первую очередь следует отметить огромные успехи в области углубления и развития теории неравномерного движения воды в открытых руслах.



Рис. 1.2. ДнепрогЭС

Академик **Н. Н. Павловский** (1886–1937) разработал новые методы интегрирования основного уравнения неравномерного движения, построения кривых подпора в призматических руслах (каналах), рекомендовал более совершенные способы построения кривых подпора в естественных (речных) руслах. Н. Н. Павловский издал первый в России «Гидравлический справочник» и монографию по гидравлике, на основе трудов Н. Е. Жуковского разработал теорию фильтрации. На базе общеинститутской кафедры гидравлики Ленинградского политехнического института им была создана научно-педагогическая школа в области гидравлики.

Пятый этап – 60-е гг. XX в. – настоящее время. Этот этап можно охарактеризовать как научную революцию. Достижения в области гидравлики послужили теоретической основой для расчетов в инженерной гидрологии при решении задач проектирования в гидротехнике, гидромелиорации, гидроэнергетике, водоснабжении, строительстве мостов и др.

Здесь следует отметить следующих российских советских ученых в области гидравлики и инженерной гидрологии:

Р. Р. Чугаев (1904–1981) – Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации (ВНИИГиМ, г. Москва);

А. В. Караушев (1912–1989) – Государственный гидрологический институт (ГГИ, г. Санкт-Петербург);

С. Н. Крицкий (1900–1984) – ГГИ;

М. Ф. Менкель (1898–1972) – ГГИ,

а также белорусских советских ученых:

А. Г. Булавко (1911–1994) – Центральный научно-исследовательский институт комплексного использования водных ресурсов (ЦНИИКИВР, г. Минск);

В. Н. Плужников (1931–1998) – ЦНИИКИВР;

В. М. Широков (1929–1995) – Белорусский государственный университет (БГУ, г. Минск).

В настоящее время в Беларуси исследования и изыскания для целей проектирования совместно ведут научно-исследовательские институты и проектные организации. Осуществление комплексного использования и охраны водных ресурсов ставит перед учеными и инженерами ряд новых задач, требует дальнейшего расширения и углубления наших знаний по гидравлике и инженерной гидрологии, внимательного изучения передового зарубежного опыта, а также успешного обучения молодых кадров белорусских ученых и инженеров-гидрометеорологов.

1.3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Современная гидравлика и инженерная гидрология располагают большим арсеналом взаимодополняющих методов исследований. При изучении *гидравлических явлений* применяют аналитический, экспериментальный, экспериментально-теоретический методы и др.

При применении *аналитического метода* используют теоретические уравнения гидромеханики, зависимости между кинематическими и динамическими характеристиками движущейся жидкости, получаемые на основе строгого математического анализа. Однако решить большинство практических задач, используя только эти методы, невозможно. Поэтому в гидравлике широко применяются упрощенные методы решения задач в целях получения приближенных решений различных практических вопросов инженерной гидрологии.

При этом часто используются эмпирические зависимости, выявленные в результате *экспериментальных исследований* (например, формулы для определения средней скорости течения на вертикали, в поперечном сечении потока и др.). Различают эксперименты в лаборатории (рис. 1.3) и в полевых условиях.



Рис. 1.3. Экспериментальная гидравлическая лаборатория Государственного гидрологического института (г. Санкт-Петербург)

Моделирование осуществляется путем создания модельного потока, механически подобного естественному. При полном механическом подобии должно быть обеспечено геометрическое, кинематическое и динамическое подобие потоков жидкости. Коэффициенты пропорциональности между одноименными величинами модели и натуры называют *масштабами* или *константами подобия*, с их помощью производится пересчет величин, полученных на модели, к натурным их значениям, и наоборот. Достоверность модели проверяется путем сопоставления данных эксперимента с данными наблюдений.

В инженерной гидрологии важнейшее место занимают *методы полевых исследований*. В наши дни без использования или учета результатов полевых работ не обходится ни одно гидрологическое исследование. Полевые исследования подразделяют на стационарные, экспедиционные и экспериментальные.

Стационарные методы состоят в проведении систематических многолетних наблюдений за элементами водного режима на специальных гидрологических станциях и постах.

Экспедиционные методы заключаются в проведении относительно кратковременных (от нескольких дней до нескольких лет) экспедиций на водных объектах – реках, каналах, озерах, водохранилищах (рис. 1.4). При инженерно-гидрологических исследованиях стационарный и экспедиционный методы используют совместно.



Рис. 1.4. Измерение расходов воды на р. Днепр у д. Неданчичи участниками белорусско-украинской рабочей группы по гидрометеорологии

Широко используют в инженерной гидрологии и *методы экспериментальных исследований*. Различают эксперименты в лаборатории и в натуре. В лабораториях изучают различные режимы движения воды и наносов, размывы речного русла и др. Благодаря специальному выбору ряда внешних условий (например, характера почвы, растительности, крутизны склонов и т. д.) и тщательным наблюдениям создаются условия для исследований, невозможные при обычных полевых работах. Так, для изучения отдельных вопросов проводят наблюдения на так называемых экспериментальных площадках, на склонах, экспериментальных водосборах и т. д.

В инженерной гидрологии широко применяются *статистические методы* с использованием современных приемов обработки данных многолетних наблюдений и математической статистики. Они позволяют установить связи между различными гидрологическими характеристиками или между ними и другими определяющими факторами (например, гидрографическими характеристиками, атмосферными осадками и др.), а также оценить вероятность наступления того или иного гидрологического явления.

В последнее время стали широко применяться *аэрокосмические методы*. Аэрокосмические съемки позволяют вести наблюдения за русловыми и береговыми процессами, замерзанием и вскрытием рек, разливами и наводнениями, ледяными заторами, пересыханием рек, подтоплением берегов водоемов, состоянием ледников, течениями в океане, распространением загрязнения в водной среде и другими гидрологическими явлениями и процессами, включая антропогенные.

В последние годы была решена проблема пространственной «привязки» результатов полевых работ с помощью спутниковой навигации GPS (global positioning system), или системы глобального позиционирования с помощью спутников.

Завершающим этапом гидрологических исследований во многих случаях являются *теоретические обобщения и анализ* — гидрологическое районирование и картографирование, разработка и предложение более точных расчетных схем и формул, введение их в практику проектирования гидротехнических сооружений в виде новых нормативных документов и др.

Более подробно методы исследований в гидравлике и инженерной гидрологии будут рассмотрены в соответствующих разделах учебно-методического пособия.

2. ГИДРАВЛИКА

Гидравлика — наука, изучающая законы равновесия и движения жидкостей и разрабатывающая методы применения этих законов к решению практических задач.

Гидравлику подразделяют на две части: *гидростатику* и *гидродинамику*. Первая изучает законы равновесия жидкостей, а вторая — законы их движения с учетом действующих сил. Гидравлика служит теоретической основой для инженерной гидрологии.

Раздел гидродинамики, в свою очередь, состоит из двух частей. Первая посвящена теоретическим вопросам, в ней даются основные понятия и определения, уравнения движения жидкости. Вторая часть содержит изложение практических приложений теоретических основ гидравлики для инженерной гидрологии.

2.1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ

Физическое тело, обладающее легкой подвижностью, или *текучестью*, называется жидкостью. Объектом изучения гидравлики является любая капельная жидкость, но нас при изучении данной дисциплины будет интересовать только *вода*.

Физические свойства воды выражаются соответствующими физическими величинами, для количественной оценки которых используются единицы измерения. Размер основных единиц измерения установлен международными соглашениями. В соответствии с решениями X и XI генеральных конференций по мерам и весам установлена *Международная система единиц измерения* (СИ, SI — System international), которая с начала 1960-х гг. вводилась в СССР во всех областях науки и техники. Основными единицами этой системы являются единица длины — 1 метр (1 м), единица массы — 1 килограмм (1 кг), единица времени — 1 секунда (1 с).

До 1960-х гг. в СССР в основном применялись две системы единиц измерения: физическая СГС и техническая МКГСС. В указанных системах за основные единицы измерения принимались соответственно: физическая СГС — 1 сантиметр (1 см), 1 грамм (1 г), 1 секунда (1 с); техническая МКГСС — 1 метр (1 м), 1 килограмм-сила (1 кГ, или кгс),

1 секунда (1 с). Размерность некоторых физических величин в СИ, встречающихся в гидравлике, а также их русское и международное обозначение приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Размерность некоторых физических величин в СИ, встречающихся в гидравлике

Физические величины и формулы	Размерность	Единицы СИ			Рекомендуемые кратные и дольные от единиц СИ
		Наименование	Обозначение		
			русское	международное	
Длина l	L	Метр	М	m	км, см, мм
Площадь ω ($S = l^2$) *	L^2	Квадратный метр	m^2	m^2	км ² , см ² , мм ²
Объем V ($V = l^3$) *	L^3	Кубический метр	m^3	m^3	см ³ , мм ³
Скорость v ($v = l/t$) *	LT^{-1}	Метр в секунду	м/с	m/s	км/с, см/с, мм/с
Ускорение a ($a = \Delta v/\Delta t$) *	LT^{-2}	Метр на секунду в квадрате	м/с ²	m/s^2	см/с ² , мм/с ²
Масса M	M	Килограмм	кг	kg	г, мг, мкг
Сила $P = Ma$ ($F = ma$) *	LMT^{-2}	Ньютон	Н	N	кН, мН, гН
Давление P ($P = F/S$) *	$L^{-1}MT^{-2}$	Паскаль, ньютон на квадратный метр*	Па, Н/м ² *	Pa	кПа, мПа
Плотность $\rho = M/V$ ($\rho = m/V$) *	ML^{-3}	Килограмм на кубический метр	кг/м ³	kg/m^3	г/м ³ , г/см ³
Удельный вес $\gamma = P/V$ *	$L^{-2}MT^{-2}$	Ньютон на кубический метр	Н/м ³	N/m^3	мН/м ³ , кН/м ³
Динамический коэффициент вязкости μ *	$L^{-1}MT^{-1}$	Ньютон-секунда на квадратный метр	Н·с/м ²	—	—
Кинематический коэффициент вязкости ν * $\nu = \mu/\rho$	L^2T^{-1}	Квадратный метр на секунду	м ² /с	m^2/s	—
Коэффициент поверхностного натяжения σ * $\sigma = F/L$	MT^{-2}	Ньютон на метр	Н/м	—	—

* [22], с. 216–217.

Рассмотрим основные физические свойства воды, которые необходимо знать при изучении гидравлики и инженерной гидрологии.

Плотность воды ρ – отношение ее массы m к занимаемому ею объему V :

$$\rho = m/V. \quad (2.1)$$

В СИ плотность химически чистой (дистиллированной) воды при температуре ее наибольшей плотности (около 4 °С) и нормальном давлении равна 1000 кг/м³. Плотность воды зависит от температуры и давления.

Свойство воды с изменением температуры изменять свой объем называется *температурным расширением*. При охлаждении воды от 4 °С до 0 °С ее объем увеличивается очень незначительно. При нагревании воды до температуры свыше 4 °С объем ее увеличивается несколько больше (при температуре 30 °С – всего на 0,4 %, что также незначительно). Поэтому при решении практических задач этим свойством можно пренебречь.

При изменении давления, даже очень большого, вода незначительно изменяет свой объем, т. е. обладает малой *сжимаемостью*. В связи с этим при решении гидравлических задач объемным сжатием пренебрегают и считают воду практически несжимаемой.

Удельный вес жидкости γ – отношение веса жидкого тела к его объему:

$$\gamma = P/V, \quad (2.2)$$

где P – вес (сила) рассматриваемого объема воды; V – объем воды.

Из курса физики известно, что вес (сила) любого тела

$$P = mg, \quad (2.3)$$

где g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с².

В СИ единицей веса (силы) является 1 ньютон (Н), соответственно, единицей удельного веса является ньютон на кубический метр (Н/м³).

Между удельным весом и плотностью существует соотношение

$$\gamma = \rho g, \quad (2.4)$$

где γ – удельный вес, Н/м³; ρ – плотность, кг/м³; g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с².

Исходя из (2.4) удельный вес воды в СИ $\gamma = 1000 \cdot 9,81 = 9810$ Н/м³.

Вязкость воды (*молекулярная вязкость, внутреннее трение*) – свойство воды оказывать сопротивление взаимному перемещению смежных

слоев воды и обуславливающее возникновение сил трения. Вязкость объясняется силами сцепления между частицами воды.

Благодаря этому осуществляется передача движения от слоев с большей скоростью к слоям с меньшей скоростью. При этом слои, обладающие большей скоростью, испытывают торможение (трение) со стороны слоев, обладающих меньшей скоростью. Происходит сглаживание различия скоростей течения в соседних точках.

Количественно вязкость воды выражается через *динамический коэффициент вязкости* μ . В СИ μ выражается в $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$ (ньютон-секунда на квадратный метр), в СГС – в $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$.

Коэффициент динамической вязкости, отнесенный к плотности воды, называется *кинематическим коэффициентом вязкости* ν :

$$\nu = \mu/\rho. \quad (2.5)$$

Кинематический коэффициент вязкости назван так потому, что его размерность кинематическая, т. е. не включающая динамические величины (силы, массы). В СИ ν выражается в $\text{м}^2/\text{с}$ (квадратный метр на секунду).

Величина ν зависит от вида жидкости и ее температуры. Значения кинематического коэффициента вязкости дистиллированной воды приведены в табл. 2.2. Как видно, с повышением температуры величина ν уменьшается.

С ростом давления вязкость воды уменьшается, а не повышается, как у других жидкостей. Следует отметить, что вязкость воды в большей степени зависит от ее температуры и в меньшей – от давления. Увеличение минерализации несколько повышает вязкость воды: рост солености на 10 % приводит к возрастанию коэффициента вязкости примерно на 1,5 %.

Таблица 2.2

Значения кинематического коэффициента вязкости ν воды при различных значениях ее температуры

T °С	$\nu \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	T °С	$\nu \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
0	1,78	15	1,14
5	1,52	20	1,01
10	1,31	30	0,81
12	1,24	40	0,66

В сравнении с другими жидкостями вязкость воды невелика, что является ее специфическим свойством. Благодаря малой вязкости вода *текуча*, и даже небольшие по величине внешние силы приводят ее в движение. Вода способна переносить большие количества растворенных и взвешенных веществ, а также теплоты.

При аналитических исследованиях часто пользуются таким понятием, как *идеальная жидкость* — воображаемая жидкость, которая характеризуется:

а) абсолютной неизменяемостью объема (при изменении температуры и давления);

б) полным отсутствием вязкости, т. е. сил трения при любом ее движении.

Идеальной жидкости в природе не существует. Ее создают в воображении как некоторую приближенную модель реальной жидкости для облегчения вывода некоторых теоретических положений гидравлики.

Из сказанного выше ясно следующее:

- при изучении покоящейся жидкости нет надобности различать реальную и идеальную жидкости;

- при изучении движения реальной жидкости необходимо дополнительно учитывать силы трения, т. е. вязкость.

Влияние молекулярной вязкости на сопротивление движению воды в большинстве случаев является малым, и им можно пренебречь. Несмотря на незначительную вязкость воды, при изучении законов движения *реальных жидкостей* влияние вязкости необходимо учитывать.

Поверхностное натяжение — проявление сил притяжения, действующих между молекулами воды. На границе соприкосновения с твердым телом вода смачивает его поверхность, а действие силы поверхностного натяжения приводит к тому, что поверхность воды в непосредственной близости к телу искривляется, несколько приподнимаясь.

Коэффициент поверхностного натяжения σ в СИ имеет размерность Н/м. Величина σ изменяется от $75,6 \cdot 10^{-3}$ Н/м (при 0 °С) до $60,8 \cdot 10^{-3}$ Н/м (при 90 °С). По сравнению с другими жидкостями вода характеризуется очень высоким поверхностным натяжением, что способствует размыву почв и грунтов при выпадении дождей.

Вода как хорошо смачивающаяся жидкость обладает способностью подниматься в порах и капиллярах почвы и растений. Вопросы капиллярности являются весьма существенными при рассмотрении подземной фильтрации жидкости, процессов испарения, транспирации, заболачивания, обмена теплотой и веществом между водой

и атмосферой. Поверхностное натяжение играет важную роль в процессах волнообразования на поверхности воды. На величину поверхностного натяжения влияет загрязнение вод, особенно нефтяная пленка.

2.2. ГИДРОСТАТИКА

Гидростатикой называется раздел гидравлики, в котором изучаются законы равновесия жидкости и воздействия (т. е. давления) покоящейся жидкости на различные поверхности (или погруженные в нее твердые тела). Основным понятием гидростатики является *гидростатическое давление*.

2.2.1. Гидростатическое давление и его свойства

Для определения понятия гидростатического давления в сосуде с жидкостью, находящейся в состоянии покоя, условно выделим некоторый ее объем (рис. 2.1).

Плоскостью AB разделим этот объем на две части. Воздействие верхней части объема жидкости на нижнюю будет передаваться через площадь ω по плоскости раздела AB . Отбросим мысленно верхнюю часть этого объема, а для сохранения равновесия к нижней части оставшегося объема приложим силу P , заменяющую действие отброшенного объема жидкости.

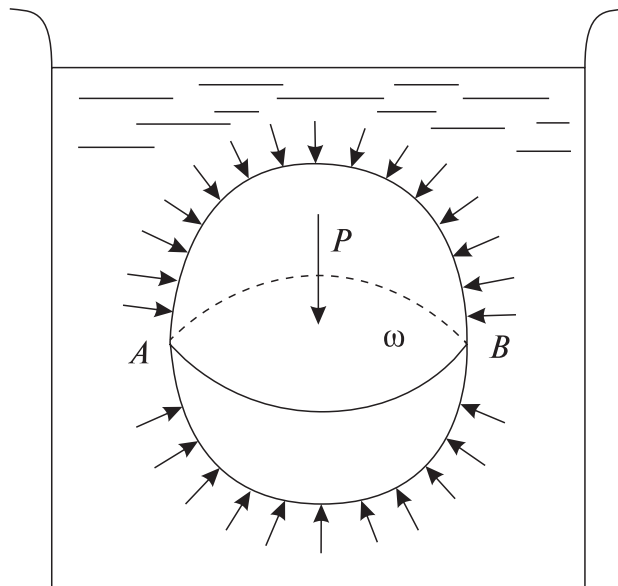


Рис. 2.1. К определению понятия гидростатического давления

Сила P , действующая на всю рассматриваемую площадь ω , называется *силой гидростатического давления* (или *суммарным гидростатическим давлением*). Отношение $P/\omega = p_{\text{ср}}$ называется средним гидростатическим давлением на площадь ω .

В СИ гидростатическое давление выражается в паскалях (Па): $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. В России и странах СНГ гидростатическое давление измеряется также и в технической системе МКГСС – в кгс/см^2 . Гидростатическое давление, равное 1 кгс/см^2 , называется технической атмосферой (ат). 1 ат соответствует высоте водяного столба 10 м:

$$1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 98066,5 \text{ Н/м}^2 = 98066,5 \text{ Па} = 98,0665 \text{ кПа}.$$

Следует отметить, что атмосферное (барометрическое) давление на уровне моря (физическая атмосфера, атм) отличается от технической атмосферы (ат). Физическая атмосфера (атм) соответствует давлению 760 мм рт. ст., или 10,33 м вод. ст. Таким образом,

$$1 \text{ атм} = 1,033 \text{ кгс/см}^2 = 101\,325 \text{ Н/м}^2 = 101\,325 \text{ Па} = 101,325 \text{ кПа}.$$

Гидростатическое давление обладает двумя основными свойствами.

1. Гидростатическое давление всегда направлено нормально (перпендикулярно) к площадке, воспринимающей давление жидкости.

2. Гидростатическое давление в любой произвольно взятой точке жидкости, находящейся в состоянии покоя, одинаково во всех направлениях и не зависит от направления воспринимающей его площадки.

2.2.2. Основное уравнение гидростатики. Закон Паскаля

Для иллюстрации основного уравнения гидростатики предположим, что сосуд, изображенный на рис. 2.2, заполнен жидкостью, находящейся в состоянии покоя.

Поверхность, отделяющая жидкое тело от газовой среды (атмосферы), называется свободной поверхностью. Свободная поверхность является также поверхностью равного давления, так как во всех ее точках давление одинаково, а в открытых сосудах оно равно атмосферному давлению.

Выделим внутри объем жидкости в форме параллелепипеда, верхнее основание которого площадью ω расположено на глубине h_1 , а нижнее – на глубине h_2 .

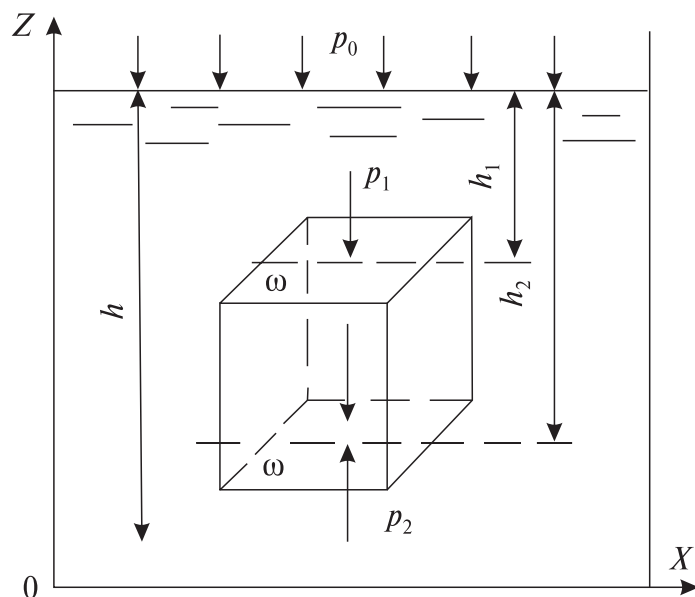


Рис. 2.2. Иллюстрация основного уравнения гидростатики

Поверхность, отделяющая жидкое тело от газовой среды (атмосферы), называется свободной. Свободная поверхность является также поверхностью равного давления, так как во всех ее точках давление одинаково, а в открытых сосудах оно равно атмосферному давлению.

Выделим внутри объем жидкости в форме параллелепипеда, верхнее основание которого площадью ω расположено на глубине h_1 , а нижнее — на глубине h_2 .

Рассмотрим рис. 2.2 совместно с уравнением

$$p_2 = p_1 + \gamma(h_2 - h_1). \quad (2.6)$$

Гидростатическое давление в некоторой точке жидкости p_2 , находящейся в состоянии равновесия, равно давлению в вышележащей точке p_1 плюс произведение удельного веса жидкости γ на разность высот этих точек $(h_2 - h_1)$. Произведение $\gamma(h_2 - h_1)$ есть весовое давление жидкости.

Если в том же объеме жидкости взять две точки, из которых одна лежит на поверхности жидкости, а вторая — на произвольной глубине h , то тогда формулу (2.6) можно записать следующим образом:

$$p = p_0 + \gamma h, \quad (2.7)$$

где p_0 — давление на свободной поверхности жидкости (в открытых сосудах оно равно атмосферному давлению); γh — весовое давление жидкости глубиной h .

Равенство (2.7) называют *основным уравнением гидростатики*. Из него следует, что гидростатическое давление в точке жидкости, находящейся

в состоянии равновесия, равно давлению на поверхности этой жидкости плюс произведение удельного веса жидкости на глубину погружения рассматриваемой точки.

Следовательно, давление p_0 , имеющееся на свободной поверхности жидкости, передается без изменения в любую точку внутри жидкости, что соответствует известному *закону Паскаля*, который гласит: *внешнее давление, производимое на свободную поверхность жидкости, находящейся в замкнутом сосуде, передается внутри жидкости во все точки без изменения.*



Блез Паскаль
(1623–1662)

Перепишем уравнение (2.7) в следующем виде:

$$p_a = p_0 + p_{\text{изб}}. \quad (2.8)$$

Здесь величина p_a — *абсолютное гидростатическое давление* на произвольной глубине; p_0 — *внешнее поверхностное давление* (в открытых сосудах или водоемах внешним является атмосферное давление); величина $p_{\text{изб}}$ (γh) называется *избыточным гидростатическим давлением*. Оно зависит от глубины погружения данной точки. Таким образом, абсолютное гидростатическое давление равно сумме внешнего и избыточного давлений.

Основное уравнение гидростатики, а также свойство жидкости передавать внешнее давление, основанное на малой ее сжимаемости, получило широкое применение в технике (гидравлические прессы, подъемные краны, домкраты и др.).

2.2.3. Пьезометрическая высота.

Пьезометры открытого и закрытого типов

Представим сосуд, наполненный жидкостью, и подключенные к нему пьезометры закрытого (слева) и открытого (справа) типов (рис. 2.3).

В *закрытом пьезометре* (рис. 2.3, слева), представляющем собой запаянную трубку, создано полное разрежение (торричеллиева пустота). Наметим в жидкости точку m . Поскольку в стеклянной трубке атмосферное давление $p_0 = 0$, то, согласно уравнению (2.8), абсолютное давление на точку m будет $p_a = p_0 + p_{\text{изб}}$. При этом уровень жидкости в трубке поднимется на некоторую высоту h_a , которая называется *абсолютной пьезометрической высотой*, т. е. высотой, отвечающей абсолютному давлению в точке m .

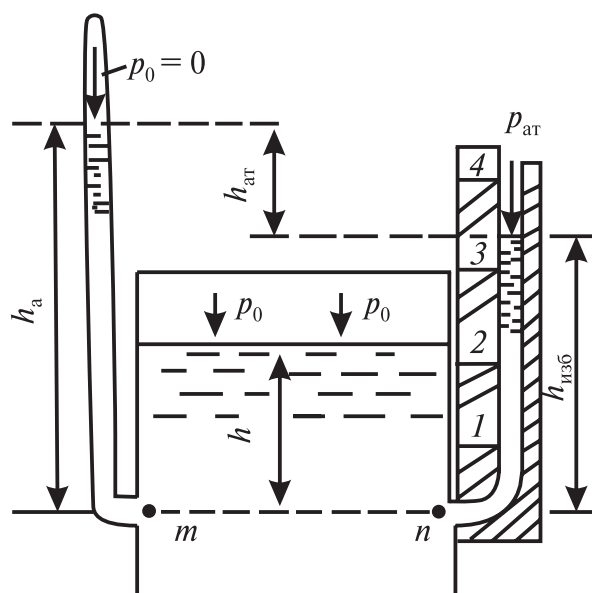


Рис. 2.3. Схема пьезометров закрытого (слева) и открытого (справа) типов

В *открытом пьезометре* (рис. 2.3, справа) у подключенной стеклянной трубки с открытым верхним концом рассмотрим точку n . В этой трубке уровень жидкости также поднимется на некоторую высоту $h_{\text{изб}}$, которая будет меньше h_a (в левой трубке) благодаря действию атмосферного давления.

Величина $h_{\text{изб}}$ называется *избыточной пьезометрической высотой*. Как видно, пьезометрическая высота $h_{\text{изб}}$ в отличие от пьезометрической высоты h_a выражает разность давлений: $p_a - p_{\text{ат}}$. Высоту h_a измеряет пьезометр закрытого типа, а высоту $h_{\text{изб}}$ — пьезометр открытого типа.

При лабораторных гидравлических исследованиях в качестве *пьезометров* обычно используются стеклянные трубки диаметром не менее 0,5 см. При меньших диаметрах трубок за счет сил капиллярного поднятия образуется заметный мениск, требующий внесения поправок в отсчеты. Пьезометры открытого типа применяют для измерения малых давлений (до 0,5 атм). Так как в трубке пьезометра находится та же жидкость, что и в резервуаре, то пьезометр позволяет измерять гидростатическое давление в натуральном масштабе (1 ат \sim 10 м вод. ст.). Следовательно, прибор не требует тарирования, что является его большим достоинством (шкала деления на рис. 2.3 приведена в метрах).

Для измерения значительных давлений (более 3–4 м вод. ст.) трубки пьезометров должны иметь чрезмерную высоту. Поэтому при необходимости измерить значительное давление используются *манометры*.



Рис. 2.4. Пружинный манометр

Применение какого-либо конкретного из видов манометров обуславливается особенностями технологического процесса, сферой использования, а также возможностью применения в тех или иных условиях. Всего имеется пять видов манометров: жидкостные, пружинные, мембранные, электроконтактные (ЭКМ), дифференциальные. Наиболее широко применяются пружинные манометры (рис. 2.4). Их достоинства – в простоте конструкции, надежности и пригодности для измерения давления среды в широком диапазоне.

2.2.4. Вакуум и вакуумметрическое давление. Вакуумметры

Если в некоторой области A давление меньше атмосферного, то говорят, что в ней *вакуум*. Для измерения такого давления применяется обратный пьезометр, называемый *вакуумметром*. Его схема приведена на рис. 2.5.

Вакуумметр представляет собой трубку, одним концом соединенную с областью A , где измеряется давление, а другим концом опущенную во вспомогательный сосуд B с жидкостью, на свободной поверхности которой давление равно атмосферному $p_{ат}$.

Под действием атмосферного давления жидкость из сосуда B поднимается по трубке на некоторую высоту $h_{вак}$, называемую *вакуумметрической высотой* или высотой вакуума. Давление в точке m со стороны жидкости в сосуде B равно $p_{ат}$.

Таким образом, $h_{вак}$ характеризует разность атмосферного ($p_{ат}$) и абсолютного (p_a) давлений в точке m . Именно эта разность, а не само давление называется *вакуумом*. Разница между атмосферным давлением и давлением в сосуде, если оно меньше атмосферного, называется *вакуумметрическим давлением*:

$$h_{вак} = p_{ат} - p_a.$$

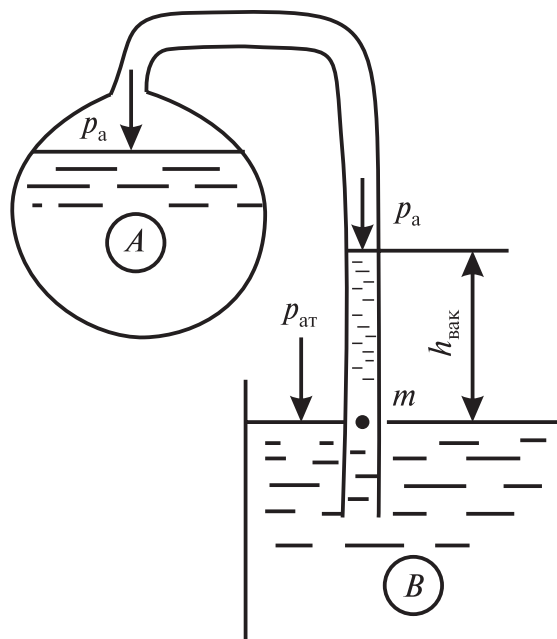


Рис. 2.5. Схема вакуумметра

Вакуумметрическое давление может изменяться от нуля, когда давление в закрытом сосуде равно атмосферному, до 1 ат, когда давление в сосуде равно нулю. Вакуум – это не пустота (торричеллиева пустота), а *недостаток давления до атмосферного*. Величина вакуума выражается в тех же единицах, что и давление.

Приборы для измерения вакуумметрического давления называют вакуумметрами. Вакуумметры бывают жидкостными (водяные, спиртовые, ртутные), механическими (пружинные и мембранные) и электрическими. По конструкции и принципу действия они аналогичны манометрам. На шкале вакуумметра знак минус перед значением показывает отрицательное давление по отношению к атмосферному (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Вакуумметр

Пример 2.1

Определить абсолютное гидростатическое давление p в открытом водоеме в точке, расположенной в воде на глубине $h = 3$ м, в СИ и МКГСС.

Решение. 1-й способ. Абсолютное гидростатическое давление в указанной точке определим по уравнению (2.7): $p = p_0 + \gamma h$. В СИ внешнее атмосферное давление $p_0 = 98,1$ кПа. Удельный вес воды $\gamma = 9,81$ кН/м³. Тогда $p = 98,1$ кПа + $9,81$ кН/м³ · 3 м = $98,1$ кПа + $29,4$ кПа = $127,5$ кПа.

2-й способ. Абсолютное гидростатическое давление в указанной точке определим по уравнению $p = p_{\text{атм}} + p_{\text{изб}}$. В системе МКГСС внешнее (атмосферное) давление $p_{\text{ат}} = 1$ ат, что соответствует 10 м вод. ст. Тогда на глубине 3 м избыточное гидростатическое давление $p_{\text{изб}}$ будет $3/10 = 0,3$ ат, а суммарное гидростатическое давление p составит $1 + 0,3 = 1,3$ ат.

2.2.5. Суммарное гидростатическое давление на плоские поверхности

Рассмотрим наиболее часто встречающийся на практике случай определения суммарного гидростатического давления на плоские поверхности при проектировании плотин водохранилищ (рис. 2.7), прудов, гидротехнических затворов, щитов, шлюзов-регуляторов мелиоративных систем и т. д.



Рис. 2.7. Плотина Саковщинского водохранилища на р. Западная Березина

На рис. 2.8, а, б представлена графическая иллюстрация к определению силы суммарного гидростатического давления на вертикальную плоскую подпорную стенку AD .

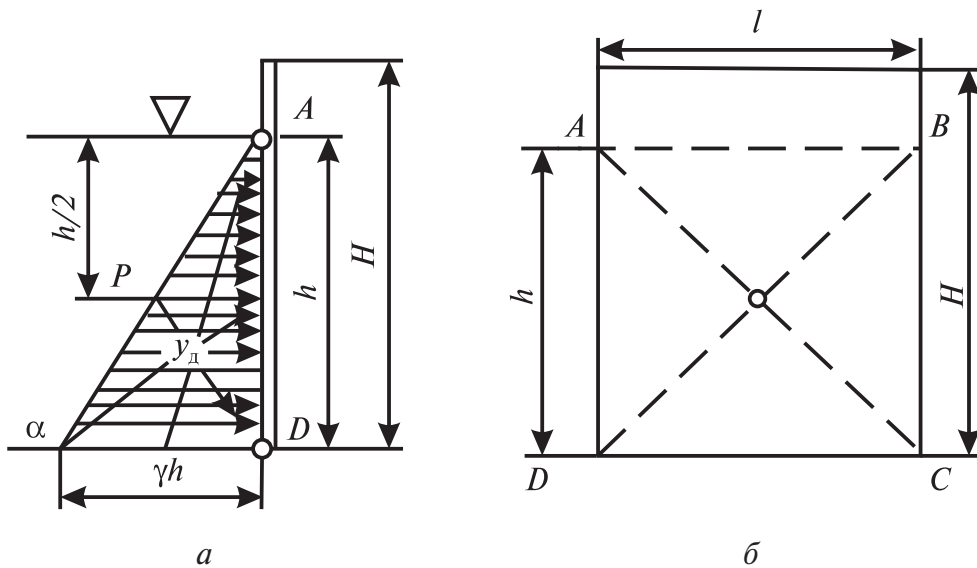


Рис. 2.8. К определению силы суммарного гидростатического давления на вертикальную плоскую подпорную стенку:
 а – эпюра гидростатического давления;
 б – суммарное гидростатическое давление

Как сказано выше, гидростатическое давление в каждой точке жидкости, расположенной на любой глубине, определяется исходя из основного уравнения гидростатики (2.7):

$$p = p_0 + \gamma h = p_{\text{ат}} + p_{\text{изб}}.$$

Гидростатическое давление жидкости на всей площади поверхности стенки $ABCD$ (см. рис. 2.8, б) складывается из суммы давлений во всех ее точках и называется *суммарным гидростатическим давлением* жидкости.

Следует отметить, что атмосферное давление $p_{\text{ат}}$, действующее на свободную поверхность жидкости, уравновешивается таким же атмосферным давлением, действующим снаружи на подпорную стенку. Поэтому при расчете стенок на прочность и устойчивость определяют и учитывают только избыточное гидростатическое давление $p_{\text{изб}} = \gamma h$. Оно пропорционально глубине погружения точки h . Графическое изображение распределения давления по высоте вертикальной стенки (см. рис. 2.8, а) называется *эпюрой гидростатического давления*. В каждой точке давление нормально (перпендикулярно) к поверхности стенки.

Эпюра избыточного давления в плоскости перпендикулярной стенки изображена треугольником αAD . Каждая ордината этого треугольника

представляет собой избыточное давление в соответствующей точке стенки, а площадь треугольника – силу суммарного избыточного давления жидкости на стенку в перпендикулярной ей плоскости.

Избыточное суммарное давление P , оказываемое на плоскую стенку $ABCD$, находящуюся под воздействием жидкости,

$$P = \gamma lh(h/2), \quad (2.9)$$

где γ – удельный вес воды; l – длина подпорной стенки; h – глубина воды перед стенкой; lh – площадь смоченной поверхности; $h/2$ – центр тяжести площади смоченной поверхности.

Пример 2.2

В открытом водоеме устроена подпорная стенка высотой $H = 6$ м и длиной $l = 50$ м. Глубина воды перед стенкой $h = 5$ м. Удельный вес воды $\gamma = 9,81$ кН/м³. Определить силу суммарного гидростатического давления на стенку.

Решение. Сила суммарного давления определяется по формуле (2.9): $P = \gamma lh(h/2)$. Площадь смоченной поверхности стенки $lh = 50 \cdot 5 = 250$ м². Центр тяжести площади смоченной поверхности находится на расстоянии $h/2 = 2,5$ м, тогда $P = 9,81$ кН/м³ · 250 м² · 2,5 м = 6131 кН.

Большое значение при проектировании гидротехнических сооружений (ГТС) имеет определение координаты центра давления – точки приложения суммарного давления жидкости. Координата центра давления – это расстояние от свободной поверхности жидкости до центра давления u_d .

Избыточное гидростатическое давление, возрастая с увеличением глубины, неравномерно распределяется по площади фигуры, и поэтому центр давления всегда находится ниже центра тяжести смоченной поверхности. Наглядное представление дает графический способ определения координаты центра давления. Для этого построим эпюру гидростатического давления.

В точке A (см. рис. 2.8, a) $h = 0$, $p_{изб} = 0$, а в точке D , где глубина $h = 5$ м, $p_{изб} = \gamma h = 9,81$ кПа · 5 = 49,0 кПа. Отложив отрезок αD (в принятом масштабе), соответствующий величине $p_{изб}$, и соединив конец этого отрезка с точкой A прямой линией, получим распределение давления по высоте стенки, т. е. эпюру гидростатического давления.

Равнодействующая сила суммарного давления жидкости на стенку будет направлена нормально к стенке и пройдет через центр тяжести треугольника αAD , который является центром давления u_d .

Но, как известно из геометрии, центр тяжести треугольника располагается на пересечении медиан треугольника на расстоянии $1/3$ высоты

от его основания или $2/3$ высоты от вершины треугольника, т. е. от поверхности. Следовательно, сила суммарного давления будет приложена в центре давления y_d , находящемся от поверхности воды на расстоянии

$$y_d = \frac{2}{3}h = \frac{2}{3}5 = 3,33.$$

В практике проектирования гидротехнических сооружений приходится определять силу гидростатического давления не только на плоские, но и на криволинейные поверхности любого вида (цилиндрические и др.). Особенно важно это для инженеров-гидротехников, так как таким путем определяют силы, действующие на внутренние стенки трубопроводов, водяных баков, на секторные, сегментные и вальцовые затворы водопропускных сооружений и т. п.

Далее мы не будем рассматривать эти вопросы, поскольку они не входят в задачу настоящего курса, посвященного гидравлике и ее приложениям к гидрологии открытых потоков – рек, каналов, ручьев.

2.2.6. Равновесие плавающих тел. Закон Архимеда

Способность тела удерживаться на поверхности жидкости или на определенном уровне внутри нее называется *плаванием*. Рассмотрим действие сил давления на тело, погруженное в неподвижную жидкость (рис. 2.9).

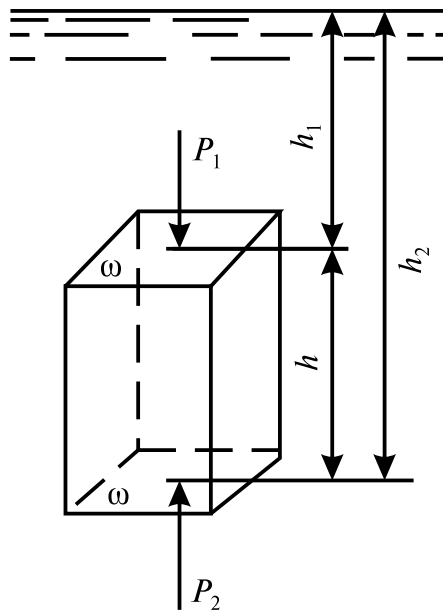


Рис. 2.9. К доказательству закона Архимеда

В нашем случае это призма высотой h , с площадями верхнего и нижнего оснований ω и объемом V . На все грани призмы будут действовать силы гидростатического давления. При этом силы, действующие на боковые поверхности призмы, будут взаимно уравновешиваться, так как они равны по величине и противоположны по направлению.

Так как $h_2 > h_1$, то и $P_2 > P_1$. Результирующая сила гидростатического давления, действующая на призму, будет стремиться приподнять ее вверх и вытолкнуть из жидкости. Эта сила, по величине равная разности сил, действующих на нижнее и верхнее основания призмы ($P_2 - P_1$), – *подъемная*, или *архимедова, сила*:

$$P_{\text{п}} = P_2 - P_1 = \gamma\omega h_2 - \gamma\omega h_1 = \gamma\omega h = \gamma V, \quad (2.10)$$

где ω – площадь основания призмы; h – высота призмы; V – объем призмы; γV – вес жидкости в объеме призмы.

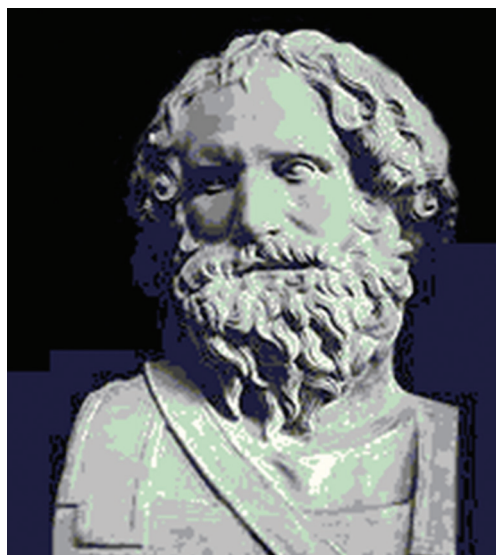
Таким образом, подъемная сила, действующая на тело, погруженное в жидкость, равна весу объема жидкости, вытесненного телом.

Это положение впервые было установлено знаменитым греческим физиком и математиком Архимедом в 250 г. до н. э. и известно как *закон Архимеда: тело, погруженное в жидкость, находится под действием подъемной силы гидростатического давления, направленной снизу вверх и равной весу объема жидкости, вытесненного телом.*

Если подъемная сила больше веса тела, погруженного в жидкость, тело всплывает, если вес тела больше подъемной силы, оно тонет. Если же подъемная сила и вес тела, погруженного в жидкость, равны, то тело плавает в полупогруженном состоянии. Способность тела плавать в полупогруженном состоянии называется *плавучестью*.

Иными словами, тело, погруженное в воду, теряет в своем весе столько, сколько весит вытесненная им вода. Именно эта потеря веса и равна равнодействующей силе гидростатического давления.

Наш вывод был сделан применительно к случаю объема, имеющего форму параллелепипеда. Однако тело любой формы может рассматриваться как составленное из элементарных параллелепипедов, поэтому доказанный выше закон является общим для тел независимо от их формы.



Архимед (ок. 287–212 гг. до н. э.)

2.2.7. Статическая остойчивость плавающего судна и ее условия

В судостроении плавучесть имеет очень большое значение. На плавающее тело, например судно, могут действовать различные внешние силы – ветер, неравномерная нагрузка, под действием которых может произойти отклонение тела от положения равновесия, т. е. крен тела. Способность плавающих тел восстанавливать нарушенное при крене равновесие называется *статической остойчивостью*.

На рис. 2.10, *a–г* показаны условия статической остойчивости плавающего судна.

Рассмотрим основные термины и определения.

Плоскость плавания – плоскость сечения судна поверхностью воды.

Ватерлиния – линия пересечения плоскости плавания с боковой поверхностью судна *тп*.

Ось плавания AB – линия, перпендикулярная плоскости плавания при нормальном положении судна и проходящая через *центр тяжести* судна *C*.

Центр водоизмещения D – центр тяжести объема погруженной части судна; при нормальном положении судна он будет расположен на оси плавания.

Сила G (вес судна) приложена в его центре тяжести *C* и направлена вниз.

Подъемная сила P приложена в центре водоизмещения *D* и направлена вверх.

Когда точка *D* находится выше точки *C* (см. рис. 2.10, *a*), судно будет устойчивым, если ниже (см. рис. 2.10, *б*) – необходимо обеспечить условия для устойчивости судна.

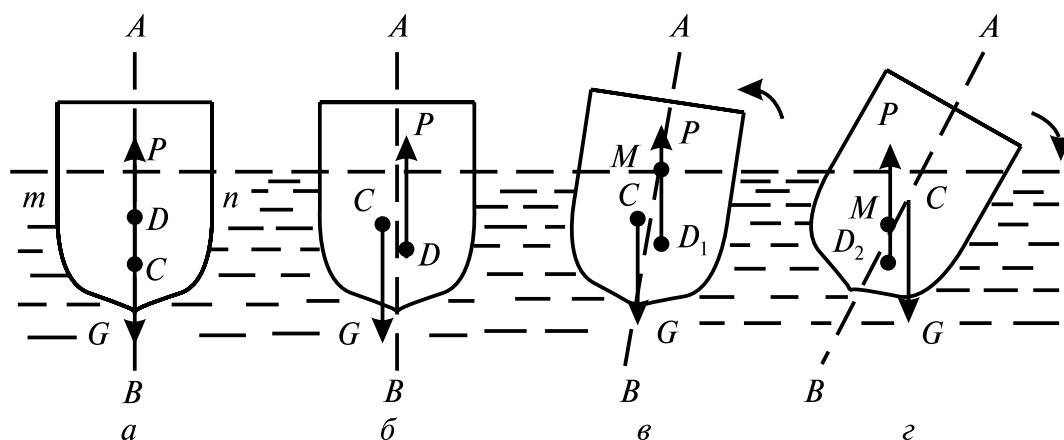


Рис. 2.10. Условия статической остойчивости плавающего судна

При небольших углах крена (до 15°) центр водоизмещения D_1 перемещается по дуге окружности, центром которой является некоторая точка M на оси плавания. Эта точка называется *метацентром* (см. рис. 2.10, в). При небольших углах крена метацентр располагается выше центра тяжести C , и положение судна будет всегда устойчивым, так как момент действия вращающей пары сил G и P будет возвращать судно в нормальное положение.

При более значительных углах крена, превышающих 15° (см. рис. 2.10, г), центр водоизмещения D_2 может переместиться так, что метацентр M окажется ниже центра тяжести C и дополнительный момент от действия пары сил G и P будет стремиться опрокинуть судно. В этом случае судно будет находиться в неустойчивом положении.

Исследование этих вопросов излагается в дисциплинах по кораблестроению. Практический же вывод для гидрологов таков: при загрузке плавсредства самые тяжелые грузы надо размещать на дне судна, т. е. так, чтобы центр тяжести C оказался как можно ниже.

2.3. ГИДРОДИНАМИКА

Гидродинамикой называется раздел гидравлики, в котором изучаются законы движения жидкостей с учетом действующих сил, а также взаимодействие потока жидкости с твердыми телами. Гидродинамику можно разделить на теоретическую и практическую части.

Первая рассматривает теоретические вопросы, основные понятия и определения, уравнения движения жидкости.

Вторая часть, более обширная, содержит изложение практических приложений теоретических основ гидравлики для инженерной гидрологии. Отдельный комплекс вопросов в этой части, посвященный открытым потокам, называется *речной гидравликой*, которой в данной дисциплине уделяется наибольшее внимание. Здесь гидродинамика выступает как инженерное направление для решения многих практических задач на основе эмпирических зависимостей, установленных опытным путем, и на основе теоретических выводов.

2.3.1. Гидравлические параметры потока

Для анализа основных закономерностей движения воды будем рассматривать следующие гидравлические параметры потока.

Площадь водного (поперечного) сечения ω (м^2) — площадь, ограниченная профилем русла и уровнем воды. При определении расхода

воды выделяют *площадь живого сечения*, которая меньше площади водного сечения на величину мертвого пространства (застойной зоны).

Ширина потока B (м) – расстояние между урезами русла по линии, перпендикулярной потоку.

Глубина потока h (м) – расстояние по вертикали от поверхности воды до дна. Различают *максимальную глубину h_{\max}* и *среднюю глубину $h_{\text{ср}}$* – частное от деления площади водного сечения на его ширину:

$$h_{\text{ср}} = \omega / B.$$

Смоченный периметр χ (м) – длина подводного контура поперечного сечения.

Гидравлический радиус R (м) – частное от деления площади водного сечения на длину смоченного периметра:

$$R = \omega / \chi.$$

Для равнинных рек, смоченный периметр которых незначительно превышает ширину, величину R можно заменить величиной $h_{\text{ср}}$ при условии, что

$$h_{\text{ср}} / R < 0,1.$$

Скорость течения v (м/с) – расстояние, на которое перемещается некоторый объем воды за единицу времени. *Средняя скорость течения $v_{\text{ср}}$* – частное от деления расхода воды на площадь водного сечения:

$$v_{\text{ср}} = Q / \omega.$$

Расход воды Q (м³/с) – объем воды, протекающий через живое сечение потока в единицу времени:

$$Q = \omega v_{\text{ср}}.$$

Продольный уклон i – отношение разности высотных отметок уровня воды на рассматриваемом участке к длине этого участка:

$$i = \Delta H / l.$$

Выражается в относительных величинах (м/м) или в промилле (‰).

2.3.2. Виды движения воды. Уравнение неразрывности потока

Движение воды можно классифицировать:

а) по изменению гидравлических характеристик водного потока во времени и по длине (установившееся, равномерное, неравномерное, неустановившееся);

б) по гидродинамическому режиму (ламинарное, турбулентное).

По изменению гидравлических характеристик различают следующие виды движения воды.

Установившееся движение. Такое движение воды в данном створе, при котором скорость течения, параметры поперечного сечения, а следовательно, и расход воды не изменяются с течением времени. Примером установившегося движения может быть течение воды в канале или на реке в период устойчивой межени. Установившееся движение (на рассматриваемом участке), в свою очередь, подразделяют на равномерное и неравномерное.

Равномерное установившееся движение. Такое движение на рассматриваемом участке, при котором скорость и гидравлические параметры потока не меняются по его длине при постоянном расходе воды. Равномерным можно считать движение жидкости в канале неизменного сечения или трубе.

Неравномерное установившееся движение. Такое движение на рассматриваемом участке, при котором скорость и гидравлические параметры потока меняются по его длине при постоянном расходе воды. Такое движение наблюдается в естественном русле в период устойчивой межени.

Рассмотрим поток с установившимся движением (рис. 2.11).

На участке, где поток не теряет и не получает воды извне, проведем два сечения: 1-1 и 2-2. Обозначим площади живых сечений и средние скорости в них соответственно ω_1 , ω_2 и v_1 , v_2 . Расходы воды в указанных сечениях определяются по формуле

$$Q_1 = \omega_1 v_1, Q_2 = \omega_2 v_2. \quad (2.11)$$

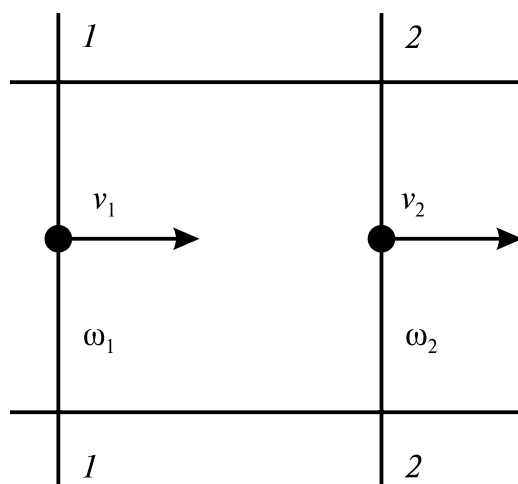


Рис. 2.11. К выводу уравнения неразрывности потока

Так как движение воды в потоке установившееся, эти расходы должны быть

$$Q = \omega_1 v_1 = \omega_2 v_2 = \text{const.} \quad (2.12)$$

Это уравнение называется *уравнением неразрывности* или *постоянства расхода воды* по всей длине на рассматриваемом участке.

Из уравнения (2.12) получим

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad (2.13)$$

т. е. средняя скорость потока обратно пропорциональна площади живого сечения.

Отсюда следует, что увеличение площади поперечного сечения вдоль реки (от створа 1 к створу 2) повлечет за собой уменьшение скорости течения на данном участке, а уменьшение площади поперечного сечения — увеличение скорости течения на этом участке.

2.3.3. Кривые свободной поверхности потока

При равномерном установившемся движении уклон поверхности потока I равен уклону дна i и водная поверхность параллельна поверхности дна.

Неравномерное установившееся движение может быть замедленным и ускоренным. При этом меняется форма *кривой свободной поверхности потока* (рис. 2.12).

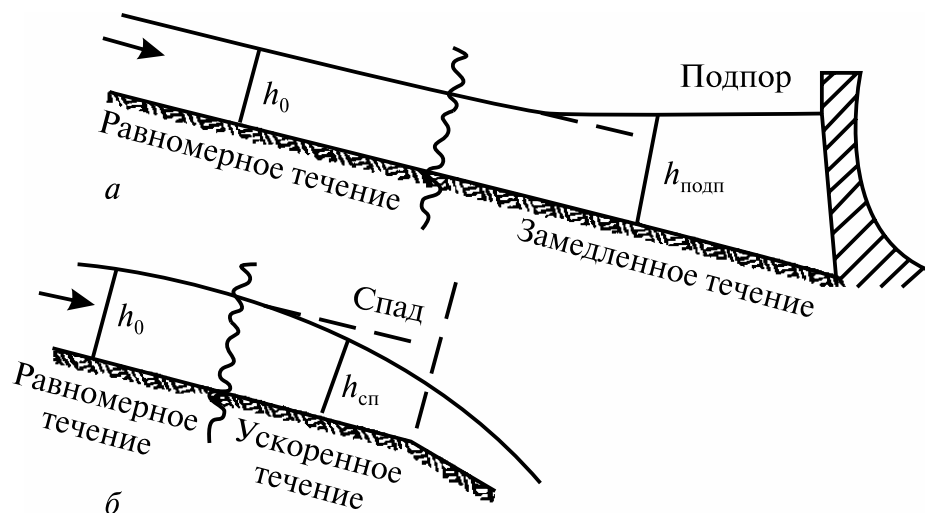


Рис. 2.12. Кривые свободной поверхности потока (по А. В. Караушеву, 1969):
а — кривая подпора; б — кривая спада

При замедленном течении она принимает форму *кривой подпора*. Поверхностный уклон становится меньше уклона дна ($I < i$), глубина ($h_{\text{подп}}$) возрастает, а скорость течения уменьшается. При ускоренном течении ($I > i$) кривая принимает форму *кривой спада*, глубина ($h_{\text{сп}}$) убывает, а скорость течения возрастает.

Кривые подпора наблюдаются в зоне влияния плотины, на реке при ее слиянии с другим потоком, на котором в данный момент проходит паводок, или при ее впадении в водоем в период повышенного уровня в последнем. Кривая спада наблюдается на реке, впадающей в реку или водоем, уровни воды в которых ниже.

Построение кривых свободной поверхности выполняется при проектировании мостов, плотин и других гидротехнических сооружений, взаимодействующих с потоками. При этом возникает необходимость определить величины подпора или спада, глубины и скорости течения в различных сечениях реки, расстояние от начала до места, где подпор имеет максимальное значение, и в других случаях. При построении кривой подпора или спада учитываются форма, параметры, уклон и шероховатость русла, а также расход воды в нем. Построение осуществляется по соответствующим зависимостям, известным в гидравлике.

Неустановившееся движение. Такое движение воды, при котором все гидравлические параметры изменяются во времени и по длине потока. Примером неустановившегося движения может быть течение воды в периоды половодья и паводков (см. ниже п. 2.4.3), искусственного регулирования речного стока (попуски из водохранилищ) и т. д. Неустановившееся движение представляет собой общий вид движения, по отношению к которому установившееся (неравномерное и равномерное) является частным случаем.

2.3.4. Два режима движения воды: ламинарное и турбулентное. Число Рейнольдса

В природе существует два режима движения воды (по гидродинамическому режиму) – ламинарное и турбулентное.

Ламинарное движение (от лат. «ламинарный», т. е. слоистый) – режим, при котором частицы воды движутся по параллельным траекториям без перемешивания. Скорость течения зависит от вязкости жидкости, а сопротивление движению пропорционально первой степени скорости. Ламинарный режим характерен для подземных вод в мелкозернистых грунтах.

Турбулентное движение (от лат. «турбулентный», т. е. беспорядочный) – режим, при котором движение имеет хаотический характер, наблюдаются процессы перемешивания воды, скорости течения непрерывно изменяются по величине и направлению. Скорость течения практически не зависит от вязкости, а сопротивление движению пропорционально квадрату скорости.

Ламинарный режим переходит в турбулентный при увеличении скорости течения. Гидродинамический режим потока характеризуется *числом Рейнольдса* Re :

$$Re = \frac{v_{cp} R}{\nu} \approx \frac{v_{cp} h_{cp}}{\nu}, \quad (2.14)$$

где v_{cp} – средняя скорость течения, м/с; R – гидравлический радиус, м; h_{cp} – средняя глубина потока, м; ν – кинематический коэффициент вязкости, равный для воды (при температуре 20 °С) $1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Речные потоки всегда имеют русло, ширина которого во много раз превышает глубину, поэтому в уравнениях, применяемых к таким потокам, гидравлический радиус R заменяется средней глубиной h_{cp} .

Критическое значение Re , соответствующее переходу от ламинарного к турбулентному режиму, лежит в диапазоне от 300 до 3000. При $Re > 3000$ режим турбулентный, при $Re < 300$ – ламинарный, в диапазоне $300 < Re < 3000$ – переходный. В естественных открытых потоках (реках, ручьях) движение практически всегда турбулентное. С увеличением скорости течения интенсивность перемешивания усиливается. Оно способствует выравниванию температуры, концентрации взвешенных и растворенных частиц в потоке.

Пример 2.3

В период летней межени на р. Западная Березина у д. Колдыки средняя скорость течения v_{cp} во время измерений составила 0,25 м/с, а средняя глубина течения h_{cp} – 1,0 м. Определить число Рейнольдса Re .

Решение.

$$Re = \frac{v_{cp} h_{cp}}{\nu} = \frac{0,25 \cdot 1,0}{1,01 \cdot 10^{-6}} \approx 250\,000.$$

Из формулы (2.14) видно, что при глубине потока 1,0 м движение будет ламинарным при $v_{cp} < 0,003$ м/с. На практике ламинарное движение может наблюдаться в относительно гладких каналах, а также в трубопроводах. От гидродинамического режима зависит внутреннее трение в потоке и вертикальное распределение скорости течения.

2.3.5. Закон Ньютона о внутреннем трении в жидкости

В ламинарном потоке возникающее между смежными слоями воды касательное напряжение (трение на единицу поверхности) зависит от вязкости. Математическим выражением величины вязкости, или силы внутреннего трения, является закон *Ньютона о внутреннем трении в жидкости*:

$$\tau_n = \mu \frac{\partial v}{\partial n}, \quad (2.15)$$

где τ_n – касательное напряжение на площадке, имеющей нормаль n (или сила трения, отнесенная к единице поверхности); μ – динамический коэффициент вязкости ($\mu = \rho \nu$), Н · с/м²; $\frac{\partial v}{\partial n}$ – производная скорости течения по нормали n (или вертикальный градиент скорости по нормали n к поверхности трения).

В турбулентном потоке внутреннее касательное напряжение зависит от коэффициента турбулентного обмена A , характеризующего интенсивность турбулентного перемешивания вод:

$$\tau_n = A \frac{\partial v}{\partial n}. \quad (2.16)$$

Для определения коэффициента A в гидравлике используют эмпирические зависимости, связывающие его с глубиной, скоростью течения, уклоном и другими характеристиками потока.

В ламинарном потоке вертикальное распределение скоростей течения описывается параболой. При этом максимальная скорость находится на поверхности потока, а у дна скорость течения равна нулю. В турбулентном потоке распределение скоростей по глубине более сложное. Его закономерности подробно рассмотрены в следующем разделе.

2.4. ДВИЖЕНИЕ ВОДЫ В ОТКРЫТЫХ РУСЛАХ (ПОТОКАХ)

2.4.1. Силы, действующие на движение потоков. Формула Шези

Движение воды в реках и открытых каналах является безнапорным. Выделим в потоке некоторый объем воды двумя сечениями 1 и 2, перпендикулярными поверхности и дну (рис. 2.13).

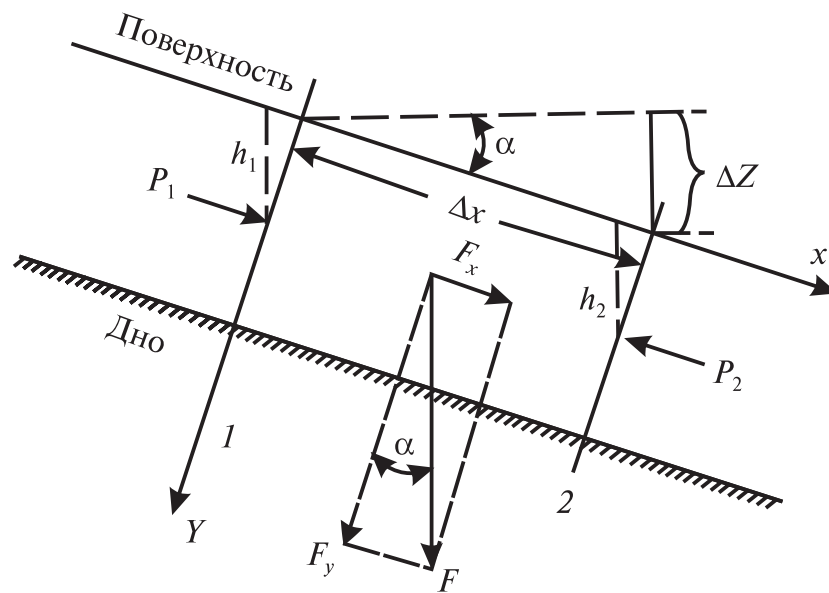


Рис. 2.13. Схема действующих в потоке физических сил
(по А. В. Караушеву, 1969)

Вода в потоке движется под действием силы тяжести F . Эту силу можно разложить на две составляющие: параллельную дну F_x и нормальную (перпендикулярную) дну F_y . Сила F_x , зависящая от уклона, вызывает движение воды в потоке. Сила гидродинамического сопротивления (трения) F_y возникает в результате трения массы воды о дно и берега и зависит от шероховатости смоченного периметра. Силы гидродинамического давления P_1 и P_2 при равенстве сечений и постоянном уклоне уравновешиваются.

Изменения уклона, шероховатости, а также сужения и расширения русла приводят к изменению скорости течения в живом сечении и по длине потока. Для вычисления средней скорости течения при отсутствии непосредственных измерений широко применяется формула Шези, которую он вывел в результате теоретических и экспериментальных исследований:

$$v_{\text{ср}} = C\sqrt{Ri} \approx C\sqrt{h_{\text{ср}}i}, \quad (2.17)$$

где $v_{\text{ср}}$ — средняя скорость течения, м/с; R — гидравлический радиус, м; $h_{\text{ср}}$ — средняя глубина потока, м; i — относительный продольный уклон, м/м; C — коэффициент Шези, м^{0,5}/с².

Величина коэффициента C зависит от глубины и шероховатости русла. Для его определения существует несколько формул. Ниже приведены наиболее распространенные формулы Павловского:

$$C = R_y/n, \quad (2.18)$$

$$y = 2,5\sqrt{n} + 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1), \quad (2.19)$$

где y – переменный показатель; n – коэффициент, зависящий от шероховатости, который находят по таблице М. Ф. Срибного (табл. 2.3) [14]. Для 12 выделенных категорий водотоков n колеблется от 0,02 – для каналов до 0,2 – для таежных рек с глухими заросшими поймами.

Значения коэффициента Шези C , рассчитанные по формулам Павловского (2.18) и (2.19), представлены в табл. 2.4. Из приведенных данных видно, что скорость потока тем больше, чем больше глубина русла, уклон водной поверхности и меньше шероховатость русла. Формула Шези широко используется в гидрологии для определения расходов воды в реках, каналах и ручьях.

Таблица 2.3

Значения коэффициента n , зависящего от шероховатости, для естественных водотоков (по М. Ф. Срибному)

Категория	Характеристика русла равнинных рек	n
I	Прямолинейные участки канализованных рек в плотных грунтах с тонким слоем илстых отложений	0,020
II	Извилистые участки канализованных рек в плотных грунтах с тонким слоем илстых отложений	0,022
III	Естественные земляные русла в весьма благоприятных условиях, чистые и прямые, со спокойным течением	0,025
IV	Галечные и гравийные русла в таких же условиях	0,030
V	Русла постоянных водотоков, преимущественно больших и средних рек, в благоприятных условиях состояния ложа и течения воды	0,035
VI	Сравнительно чистые русла постоянных водотоков в обычных условиях, извилистые, с некоторыми неправильностями в направлении струй или же прямые, но с неправильностями в рельефе дна (отмели, промоины, местами камни). Незаросшие ровные поймы	0,040
VII	Русла больших и средних рек, значительно засоренные, извилистые и частично заросшие, каменистые, с беспокойным течением. Поймы больших и средних рек, сравнительно разработанные, покрытые нормальным количеством растительности (травы, кустарники)	0,050
VIII	Русла периодических водотоков, сильно засоренные и извилистые. Сравнительно заросшие, неровные, плохо разработанные поймы рек (промоины, кусты, деревья, заводи). Порожистые участки равнинных рек	0,065

Окончание табл. 2.3

Категория	Характеристика русла равнинных рек	<i>n</i>
IX	Русла и поймы, весьма значительно заросшие (со слабым течением), с большими глубокими промоинами	0,080
X	Поймы такие же, как и в предыдущей категории, но с неправильными косоструйными течениями, заводями и т. д.	0,100
XI	Реки болотного типа (заросли, кочки, во многих местах почти стоячая вода и пр.). Поймы лесистые, с большими мертвыми пространствами, местными углублениями, озерами и т. д.	0,140
XII	Глухие поймы, сплошь лесные, таежного типа	0,200

Таблица 2.4

Значения коэффициента Шези *S*, рассчитанные по формулам Павловского

<i>R</i> , м	<i>n</i>							
	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040	0,050	0,080	0,100
0,10	30,6	22,4	17,3	13,8	11,2	8,1	3,7	2,3
0,12	32,6	23,5	18,3	14,7	12,1	8,2	4,1	2,7
0,14	33,0	24,5	19,1	15,4	12,8	9,3	4,5	3,0
0,16	34,0	25,4	19,9	16,1	13,4	10,0	4,8	3,3
0,18	34,8	26,2	20,6	16,8	14,0	10,4	5,2	3,6
0,20	35,7	26,9	21,3	17,4	14,5	10,9	5,4	3,8
0,22	36,4	27,6	21,9	17,9	15,0	11,2	5,8	4,1
0,24	37,1	28,3	22,5	18,5	15,5	11,8	6,0	4,3
0,26	37,8	28,8	23,0	18,9	16,0	12,2	6,4	4,5
0,28	38,4	29,4	23,5	19,4	16,4	12,5	6,6	4,8
0,30	39,0	29,9	24,0	19,9	16,8	12,8	6,8	5,0
0,35	40,3	31,1	25,1	20,9	17,8	13,6	7,5	5,5
0,40	41,5	32,2	26,0	21,8	18,6	14,4	8,0	5,9
0,45	42,5	33,1	26,9	22,6	19,4	15,0	8,5	6,4
0,50	43,5	34,0	27,8	23,4	20,1	15,6	8,9	6,8
0,55	44,4	34,8	28,5	24,0	20,7	16,2	9,4	7,2
0,60	45,2	35,5	29,2	24,7	21,3	16,7	9,8	7,6
0,65	45,9	36,2	29,8	25,3	21,9	17,2	10,2	7,9
0,70	46,6	36,9	30,4	25,8	22,4	17,7	10,6	8,3
0,75	47,3	37,5	30,9	26,4	22,9	18,2	11,0	8,6
0,80	47,9	38,0	31,5	26,8	23,4	18,5	11,3	8,9
0,85	48,4	38,4	31,8	27,2	23,8	18,8	11,5	9,1
0,90	48,8	38,9	32,3	27,6	24,1	19,3	11,9	9,5
0,95	49,5	39,5	32,8	28,1	24,6	19,7	12,2	9,8

$R, \text{ м}$	n							
	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040	0,050	0,080	0,100
1,00	50,0	40,0	33,3	28,6	25,0	20,0	12,5	10,0
1,10	50,9	40,9	34,1	29,3	25,7	20,6	13,0	10,5
1,20	51,8	41,6	34,8	30,0	26,3	21,2	13,5	10,9
1,30	52,5	42,3	35,5	30,6	26,9	21,8	14,0	11,4
1,40	53,2	42,9	36,1	31,2	27,4	22,2	14,3	11,8
1,50	53,9	43,6	36,7	31,7	28,0	22,7	14,8	12,1
1,60	54,5	44,1	37,2	32,2	28,4	23,1	15,1	12,4
1,70	55,1	44,7	37,7	32,7	28,9	23,5	15,4	12,8
1,80	55,6	45,1	38,0	33,0	29,2	23,8	15,7	13,0
1,90	56,1	45,6	38,4	33,4	29,7	24,2	16,0	13,3
2,00	56,6	46,0	38,9	33,8	30,0	24,8	16,2	13,6
2,50	58,7	47,9	40,6	35,4	31,5	25,8	17,4	14,6
3,00	60,3	49,3	41,9	36,1	32,5	26,6	18,2	15,2
3,50	61,5	50,3	42,8	37,4	33,3	27,4	18,7	15,7
4,00	62,5	51,2	43,6	38,1	33,9	27,9	18,9	16,0
4,50	63,4	51,7	44,1	38,5	34,4	28,4	19,2	16,1
5,00	64,1	52,4	44,6	38,9	34,6	28,5	19,3	16,2

Пример 2.4

В период летней межени на р. Западная Березина у д. Колдыки средняя глубина течения в момент обследования $h_{\text{ср}} = 1,00$ м, относительный уклон $i = 0,0001$, площадь поперечного сечения $\omega = 20,0 \text{ м}^2$. Определить среднюю скорость течения $v_{\text{ср}}$ и расход воды Q ($\text{м}^3/\text{с}$).

Решение.

1. Для р. Западная Березина $h_{\text{ср}} \approx R$.
2. Найдем коэффициент n по таблице М. Ф. Срибного. Река относится к VI категории (сравнительно чистые русла, извилистые, с некоторыми неправильностями в рельефе дна, незаросшие ровные поймы) с коэффициентом $n = 0,04$.
3. По формуле (2.18) рассчитаем коэффициент Шези C :

$$C = R^y / n = 1,0^y / 0,04 = 25,0.$$

4. По формуле (2.17) определим среднюю скорость течения:

$$v_{\text{ср}} = C\sqrt{Ri} = 25,0\sqrt{1,0 \cdot 0,0001} = 0,25 \text{ м/с}.$$

5. Определим расход воды: $Q = \omega v_{\text{ср}} = 20,0 \cdot 0,25 = 5,00 \text{ м}^3/\text{с}$.

2.4.2. Распределение скоростей течения в речном потоке. Турбулентные пульсации

Для рек характерен турбулентный режим движения воды, и скорость течения в любой точке речного потока подвержена *турбулентным пульсациям* по величине и направлению, причем тем большим, чем больше скорость течения. Каждой точке речного потока присуща *местная мгновенная скорость течения*. Гидрометрические вертушки фиксируют скорость, осредненную за некоторый интервал времени (например, 100 с). Скорости течения изменяются по глубине и по ширине живого сечения. Кривые изменения скоростей по вертикали называются *годографами* или *эпюрами скоростей*.

На рис. 2.14 показано вертикальное распределение скоростей течения в различных условиях. При свободном состоянии русла (рис. 2.14, *а*) типичным является следующее распределение скоростей по глубине, что связано с шероховатостью русла: максимальные скорости v_{\max} наблюдаются на поверхности (или на глубине $0,2h$ от поверхности), скорость, близкая к средней на вертикали, — на глубине $0,6h$ и минимум (v_{\min}), не равный нулю, — у дна. Однако под влиянием других факторов, кроме шероховатости русла, типичное распределение скоростей по глубине нарушается. Так, зимой под ледяным покровом (рис. 2.14, *б*), особенно под слоем внутриводного льда (шуги) (рис. 2.14, *в*), под влиянием трения о нижнюю поверхность льда скорость течения уменьшается.

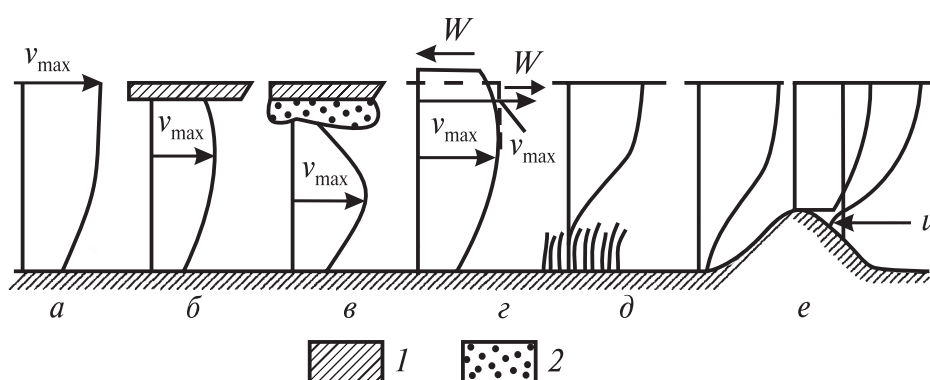


Рис. 2.14. Вертикальное распределение скоростей течения в речном потоке: *а* — типичное, *б* — под ледяным покровом, *в* — под слоем внутриводного льда (шуги), *г* — при попутном и встречном ветре, *д* — при влиянии растительности; *е* — при влиянии неровностей дна; *1* — ледяной покров, *2* — слой шуги; *W* — направление ветра, v_{\max} — максимальная скорость течения, *u* — обратное течение

В период открытого русла при попутном ветре скорость течения на поверхности увеличивается, а при встречном – уменьшается (рис. 2.14, *з*). Под влиянием растительности уменьшается скорость течения в придонном слое (рис. 2.14, *д*). Из-за неровностей дна (рис. 2.14, *е*) скорость течения перед препятствиями уменьшается ко дну, а после препятствия может возникнуть обратное течение.

При измерениях расхода воды на гидрологических постах средняя скорость течения на вертикали вычисляется делением площади эпюры скоростей на глубину вертикали или скоростей, измеренных в характерных точках по глубине, с помощью одной из формул.

1. В случае свободного от водной растительности и льда русла измерения проводят в пяти точках на вертикали ($h > 1,0$ м):

$$v_{\text{ср}} = 0,1 (v_{\text{пов}} + 3v_{0,2} + 3v_{0,6} + 2v_{0,8} + v_{\text{дно}}),$$

или в трех точках (h от 0,6 до 1,0 м):

$$v_{\text{ср}} = 0,25 (v_{0,2} + 2v_{0,6} + v_{0,8}),$$

или в двух точках (h от 0,4 до 0,6 м):

$$v_{\text{ср}} = 0,5 (v_{0,2} + v_{0,8}),$$

или в одной точке (h до 0,4 м):

$$v_{\text{ср}} = v_{0,6}.$$

2. В случае наличия водной растительности и под ледяным покровом измерения проводят в шести точках на вертикали:

$$v_{\text{ср}} = 0,1 (v_{\text{пов}} + 2v_{0,2} + 2v_{0,4} + 2v_{0,6} + 2v_{0,8} + v_{\text{дно}}),$$

или в трех точках:

$$v_{\text{ср}} = (v_{0,15} + v_{0,5} + v_{0,85})/3,$$

или в одной точке:

$$v_{\text{ср}} = 0,9v_{0,5}.$$

При инженерно-гидрологических изысканиях для проектирования наиболее важных сооружений на реках измерения скоростей течения на вертикалях проводят на значительно большем количестве точек, а вычисление средней скорости на вертикалях – более точным графическим способом.

Наглядное представление о распределении скоростей течения в живом сечении дают *изотахи* – линии, соединяющие точки с одинаковыми скоростями течения (рис. 2.15).

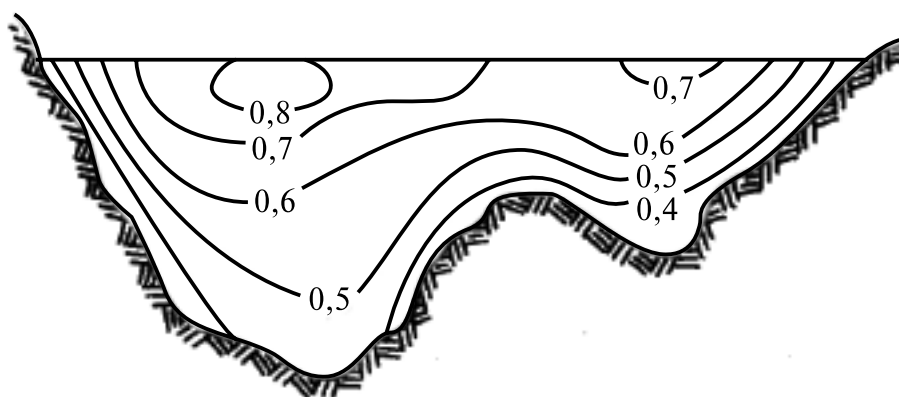


Рис. 2.15. Изотахи в живом сечении речного потока

У берегов скорость течения меньше, в центре потока она наибольшая. Продольная линия, соединяющая точки на поверхности реки с наибольшими скоростями, называется *стрежнем*. Область максимальных скоростей расположена обычно на некоторой глубине от поверхности. Линия, соединяющая по длине потока точки отдельных живых сечений с наибольшими скоростями, называется *динамической осью потока*.

2.4.3. Кривая расходов воды. Закономерности трансформации паводков

Кривая расходов воды – это графическая зависимость расхода от уровней воды $Q = f(H)$. Она имеет весьма большое практическое значение в инженерной гидрологии. Построив ее на основании сравнительно небольшого числа расходов, измеренных в пределах амплитуды колебания уровней, по данным наблюдений за уровнями можно весьма просто получить значения расходов воды на любую дату календарного года, не производя непрерывно их измерения.

В большинстве случаев используется однозначная зависимость расхода от уровня. Однако часто однозначность соотношения $Q = f(H)$ нарушается. При этом приходится применять более сложные способы установления зависимости расходов от определяющих их факторов.

Нарушение однозначной связи $Q = f(H)$ происходит при появлении ледовых образований и развитии растительности (что обусловлено

уменьшением поперечного сечения и увеличением шероховатости), а также при прохождении паводочных волн. В таких ситуациях для вычисления ежедневных расходов по кривой расходов используется хронологический график переходных коэффициентов $K_{зим} < 1$ и $K_{зар} < 1$.

Подробнее рассмотрим пример нарушения связи при прохождении *паводочной волны*. Течение воды в периоды половодья и паводков, искусственного регулирования речного стока (попуски из водохранилищ) является классическим примером неустановившегося движения. Неустановившееся движение, как отмечено в пункте 2.3.3, – такое движение жидкости, при котором все гидравлические параметры изменяются во времени и по длине потока.

При перемещении в реках волны половодья (паводка) наблюдаются уменьшение высоты и возрастание продолжительности паводка (распластывание паводка), уменьшение скорости и изменение формы паводочной волны (рис. 2.16).

Гребень волны перемещается быстрее ее подошвы под влиянием шероховатости русла и с выходом паводочных вод на пойму. Скорость перемещения паводочной волны обычно больше скорости движения самой воды в 1,2–1,5 раза.

Изменение гидравлических параметров потока происходит несинхронно: сначала своего максимума достигает уклон, затем скорость течения, потом наступает максимальное значение расхода воды и лишь после всего максимальной величины достигает уровень воды (пик паводка). Все это предопределяет неоднозначность кривой расходов: на графике появляется паводочная петля (рис. 2.17).

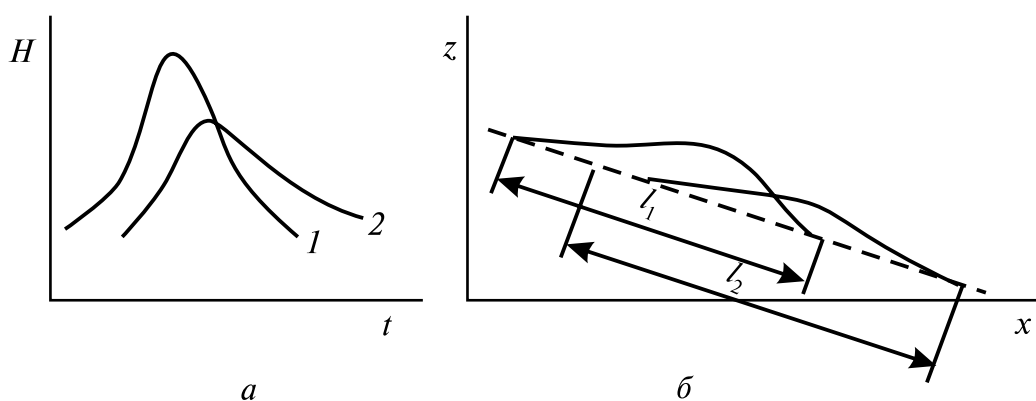


Рис. 2.16. Схема трансформации паводочной волны (по М. А. Великанову):
 а – графики изменения уровня воды в двух пунктах, расположенных последовательно вдоль русла (1 и 2); б – продольные профили паводочной волны и ее длины (l_1 и l_2) в два последовательных момента времени

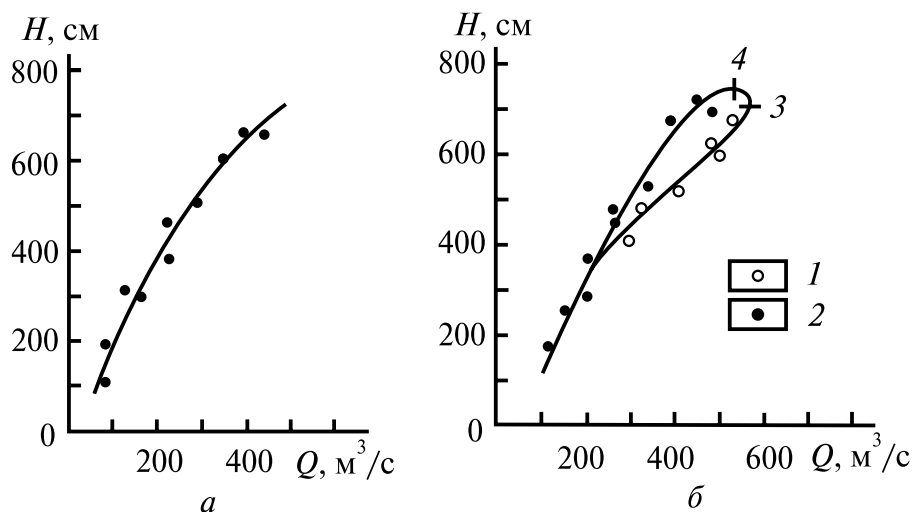


Рис. 2.17. Кривые связи расходов и уровней воды в реке:
а — однозначная; *б* — с паводочной петлей;
 точки измерения паводка: 1 — на подъеме, 2 — на спаде;
 моменты максимума: 3 — расхода воды; 4 — уровня воды

Из сделанных в разделе 2.4 выкладок следуют важные для инженерной гидрологии выводы:

1) речной поток — это саморегулирующийся природный объект, в котором глубина и скорость течения формируются в соответствии с внешними определяющими факторами — расходом воды, шириной, уклоном и шероховатостью русла;

2) между глубиной (и уровнем воды) и расходом воды в речном потоке складывается определенная нелинейная связь — «кривая расходов воды» $Q = f(H)$, используемая для расчета ежедневных расходов воды по уровням;

3) увеличение шероховатости русла (при неизменном расходе воды), например в результате образования на реке ледяного покрова или зарастания дна и берегов водной растительностью, приводит к увеличению глубины и повышению уровня воды. Поэтому зимой на реках, покрытых льдом, уровень воды обычно выше, чем летом при тех же расходах воды. В период бурного развития растительности в руслах уровень воды также стоит выше, чем в другое время года при тех же расходах воды.

2.4.4. Поперечное равновесие потока. Центробежная сила. Сила Кориолиса

Движение воды происходит не только вдоль берегов под влиянием силы тяжести. Внутри потока наблюдаются также поперечные течения в различных направлениях от оси общего движения. Первое объяснение этих движений принадлежит Н. С. Лебявскому (1897).

Согласно теории Лелявского быстрое фарватерное течение втягивает в себя воду со стороны берегов (рис. 2.18, *а*). В результате этого в зоне фарватера (зоне наибольших глубин) создается некоторое повышение уровня воды, вызывающее возникновение циркуляционных течений. Они образуют два замкнутых контура, сходящихся у поверхности и расходящихся у дна (рис. 2.18, *б*); при этом поверхностное течение, направленное к стрежню, Лелявский назвал *сбойным*. Вследствие поступательного движения эти циркуляционные токи вдоль по реке проявляются в форме винтообразных течений (рис. 2.18, *в*).

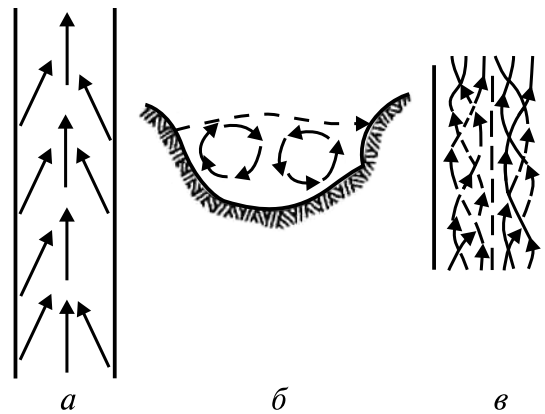


Рис. 2.18. Поперечная циркуляция по Н. С. Лелявскому:
а – со стороны берегов; *б* – у поверхности и дна; *в* – вдоль по реке

На закруглении фарватер приближается к вогнутому берегу тем ближе, чем круче поворот вогнутого берега (рис. 2.19, *а*). Происходит односторонний приток воды к фарватеру, а два циркуляционных кольца преобразуются в одностороннюю циркуляцию. При этом в области *а* скорости будут наибольшими, в области *б* – ослабленными, а в области *с* – наименьшими (рис. 2.19, *б*).

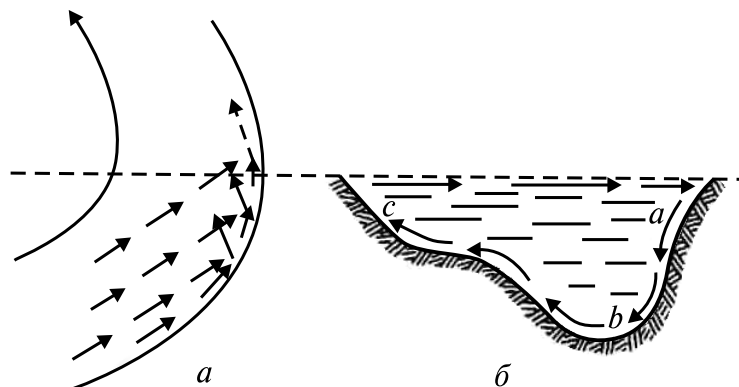


Рис. 2.19. Направление струй:
а – в плане; *б* – у вогнутого берега

Такое распределение скоростей течения способствует размыву вогнутых и накоплению наносов у выпуклых берегов, что вносит свой вклад в развитие русловых процессов.

Наиболее полно природа циркуляционных токов может быть раскрыта в связи с воздействием на речной поток центробежной силы и отклоняющей силы вращения Земли.

Центробежная сила приводит к отклонению течения в поверхностных слоях в сторону вогнутого берега, что создает поперечный перекося уровня воды. В результате у вогнутого берега в придонных слоях возникает течение, направленное в сторону выпуклого берега. Складываясь с основным продольным переносом воды в реке, разнонаправленные течения на поверхности и у дна создают спиралевидное движение воды на изгибе речного русла – *поперечную циркуляцию* (рис. 2.20, а, б).

Частица воды, движущаяся на закруглении, испытывает действие центробежной силы P_1 :

$$P_1 = mv^2/r. \quad (2.20)$$

Решая уравнение (2.20) относительно поперечного уклона ($I_{\text{поп}}$), получим

$$I_{\text{поп}} = \frac{v^2}{rg}, \quad (2.21)$$

где v – скорость течения, м/с; r – радиус изгиба русла, м; g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с².

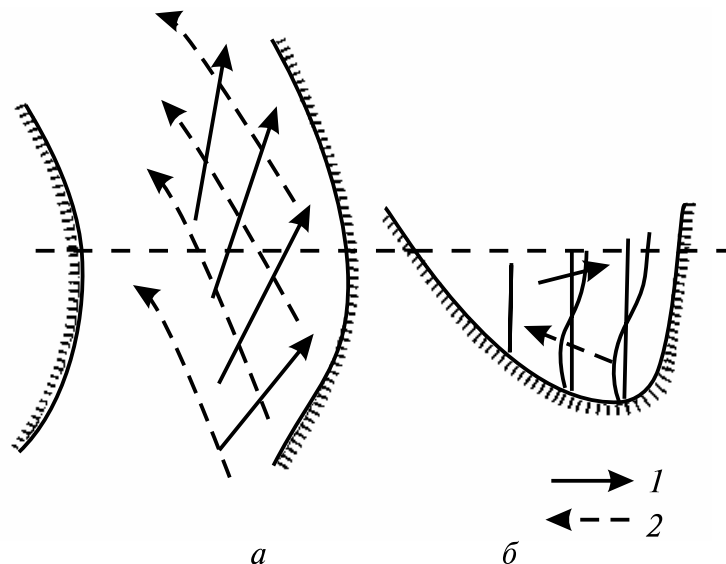


Рис. 2.20. Схема поперечной циркуляции на изгибе речного потока:

a – в плане; b – в поперечном разрезе:

1 – поверхностные струи; 2 – придонные струи

Пример 2.5

В период летней межени на р. Западная Березина на участке учебного гидрологического поста БГУ в момент измерений средняя скорость течения $v_{\text{ср}} = 0,25$ м/с, ширина реки $B = 20$ м, радиус изгиба русла, определенный по карте, $r = 300$ м. Определить поперечный уклон водной поверхности $I_{\text{поп}}$ и разность уровней между берегами $\Delta H_{\text{поп}}$.

Решение.

$$I_{\text{поп}} = \frac{v^2}{rg} = \frac{0,25^2}{300 \cdot 9,81} = 0,00002.$$

$$\Delta H_{\text{поп}} = 0,00002 \cdot 20 = 0,0004 \text{ м} = 0,04 \text{ см.}$$

Пример 2.6

Во время весеннего половодья на р. Днепр у г. Речицы средняя скорость течения $v_{\text{ср}} = 1,0$ м³/с, ширина реки $B = 200$ м, радиус изгиба русла, определенный по карте, $r = 1000$ м. Определить поперечный уклон водной поверхности $I_{\text{поп}}$ и разность уровней между берегами $\Delta H_{\text{поп}}$.

Решение.

$$I_{\text{поп}} = \frac{v^2}{rg} = \frac{1,0^2}{1000 \cdot 9,81} = 0,02 \text{ м} = 2 \text{ см.}$$

$$\Delta H_{\text{поп}} = 0,0001 \cdot 200 = 0,02 \text{ м} = 2 \text{ см.}$$

Другой силой, действующей на речной поток, является *отклоняющая сила вращения Земли*, или *сила Кориолиса* P_2 (рис. 2.21).

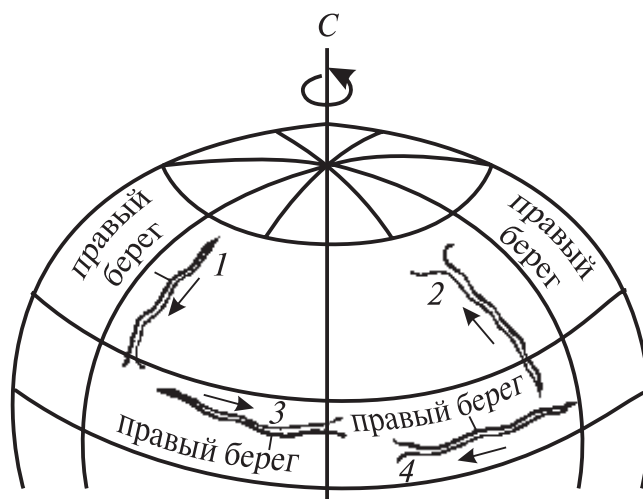


Рис. 2.21. Схема влияния вращения Земли при различных направлениях течения воды в реке:

- 1 – с севера на юг; 2 – с юга на север;
- 3 – с запада на восток; 4 – с востока на запад

Эта сила проявляется в том, что все тела, движущиеся относительно земной поверхности, в Северном полушарии получают ускорение, направленное вправо, а в Южном – влево от направления их движения:

$$P_2 = 2v\omega \sin\varphi, \quad (2.22)$$

где v – скорость движения тела; ω – угловая скорость вращения Земли; φ – географическая широта места.

Вследствие незначительного значения ω сила P_2 очень небольшая по сравнению с силой P_1 (для рассмотренного случая: р. Днепр у Речицы в период половодья – не более 5 %).

Рассмотренные силы P_1 и P_2 дополняют теорию поперечной циркуляции Лелявского, однако их влияние на поперечный уклон незначительно. Так, на р. Днепр у г. Речицы в период весеннего половодья в результате суммарного действия этих сил разность уровней воды между берегами не превышает 2 см.

Однако, действуя непрерывно в одном направлении на протяжении тысячелетий и проявляясь более заметно на больших реках при половодьях и паводках, они способствуют более сильному подмыву восточных берегов и перемещению русел рек на восток.

Рассмотренные силы P_1 и P_2 из-за их незначительного влияния в практике инженерно-гидрологических расчетов (уровней и расходов воды) не учитываются.

2.4.5. Виды потоков по состоянию водной поверхности. Число Фруда. Гидравлический прыжок

По состоянию водной поверхности потоки делят на *спокойные* и *бурные*. Спокойные потоки имеют плавную форму водной поверхности, препятствия обтекаются плавно. Бурные потоки имеют неровную форму водной поверхности со стоячими волнами, в местах препятствий образуются резкие перепады уровня.

Для определения состояния потока используют безразмерное *число Фруда* (Fr), введенное в 1870 г.:

$$Fr = \frac{v_{cp}^2}{gh_{cp}}, \quad (2.23)$$

где v_{cp} – средняя скорость течения, м/с; g – ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$; h_{cp} – средняя глубина потока, м.

При $Fr = 1$ поток находится в критическом состоянии, при $Fr > 1$ поток бурный, при $Fr < 1$ поток спокойный. Бурные потоки характерны для горных рек, спокойные – для равнинных.

Нельзя отождествлять бурные и турбулентные, спокойные и ламинарные потоки, так как характеристики этих движений качественно различны. Спокойные потоки могут быть как ламинарными, так и турбулентными, бурные – почти всегда турбулентные.

Пример 2.7

Во время весеннего половодья на р. Днепр у г. Речицы средняя скорость течения $v_{cp} = 1,0$ м³/с, средняя глубина реки $h_{cp} = 3,0$ м. Определить число Fr и характер потока по состоянию водной поверхности.

Решение.

$$Fr = \frac{v_{cp}^2}{gh_{cp}} = \frac{1,0^2}{9,81 \cdot 3,0} = 0,03.$$

Таким образом, число $Fr < 1$, характер потока р. Днепр у г. Речицы в период весеннего половодья спокойный.

На рис. 2.22 представлена схема обтекания препятствия (валуна) спокойным и бурным потоками. Спокойные потоки присущи равнинным рекам и характеризуются плавной формой водной поверхности. Препятствия обтекаются ими спокойно, образуя перед препятствием зона подъема уровня плавно сопрягается с водной поверхностью выше расположенного участка потока.

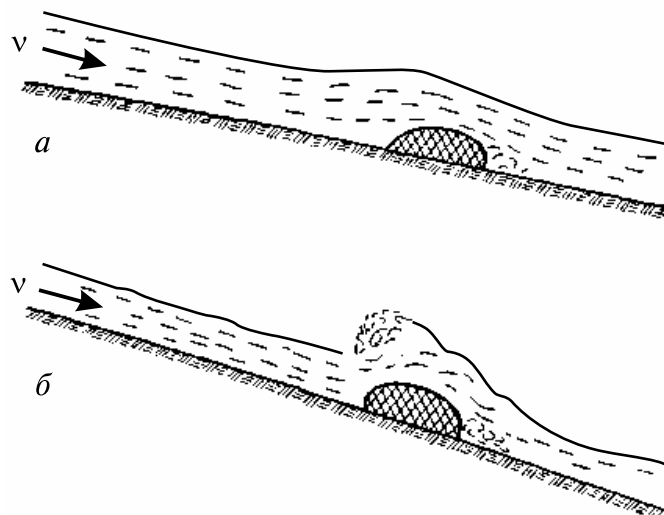


Рис. 2.22. Обтекание валуна потоками:
а – спокойным; б – бурным

Свободная поверхность бурных потоков отличается крайней неровностью, резкие повышения поверхности воды чередуются с понижениями и порогами (рис. 2.23).



Рис. 2.23. Река Страча (правый приток р. Вилия) в верхнем течении

Переход водного потока из бурного состояния в спокойное осуществляется с помощью *гидравлического прыжка* — резкого увеличения глубины потока, сопровождающегося повышением уровня воды в направлении течения. Гидравлические прыжки образуются в бурных потоках перед препятствиями или над ними.

Гидравлический прыжок является остановившейся волной. Ниже препятствий и на участках резкого увеличения уклона образуются водопады.

Начинающие изучать гидравлику иногда допускают ошибку, отождествляя бурный режим с турбулентным. Признаки этих двух характеристик течения качественно различны. Спокойные потоки могут быть как ламинарными, так и турбулентными. Можно встретить и ламинарный поток, формально характеризующийся бурным режимом, правда, такой поток должен отличаться крайне малой глубиной. Это может быть, например, слой воды, стекающий по сильно наклоненному или вертикально поставленному стеклу, и т. п.

Бурный режим, как уже отмечалось, наиболее характерен для горных рек. Конечно, надо иметь в виду, что и в горах могут встречаться реки или участки рек со спокойным режимом. Обычно же поверхность горных рек представляет собой систему остановившихся волн (гидравлических прыжков).

2.5. ВОДОСЛИВЫ

2.5.1. Определение и классификация водосливов

Водослив представляет собой преграду на пути движения потока в виде вертикальной стенки или порога, через которые переливается вода. Водосливы применяются в гидротехнических сооружениях в качестве водосливных плотин, шлюзов-регуляторов, а в гидрометрии — для измерения расхода воды.

В гидрометрии для измерения расхода воды в реках, ручьях и каналах применяются водосливы с тонкой стенкой, широким порогом и практического профиля. Из них наиболее часто применяется водослив с тонкой стенкой.

На примере такого водослива (рис. 2.24) рассмотрим основные термины и обозначения, применяемые при использовании водосливов в гидрометрии: ГВБ — отметка горизонта верхнего бьефа; ГНБ — отметка горизонта нижнего бьефа; H — напор на гребне водослива (геометрический); v_0 — скорость потока (подхода) перед гребнем; P — высота порога водослива со стороны нижнего бьефа; P_1 — высота порога водослива со стороны верхнего бьефа; h_6 — глубина нижнего бьефа; b — ширина водослива (размер перпендикулярен чертежу); δ — толщина порога водослива; Z — разность отметок горизонтов воды в верхнем и нижнем бьефах.

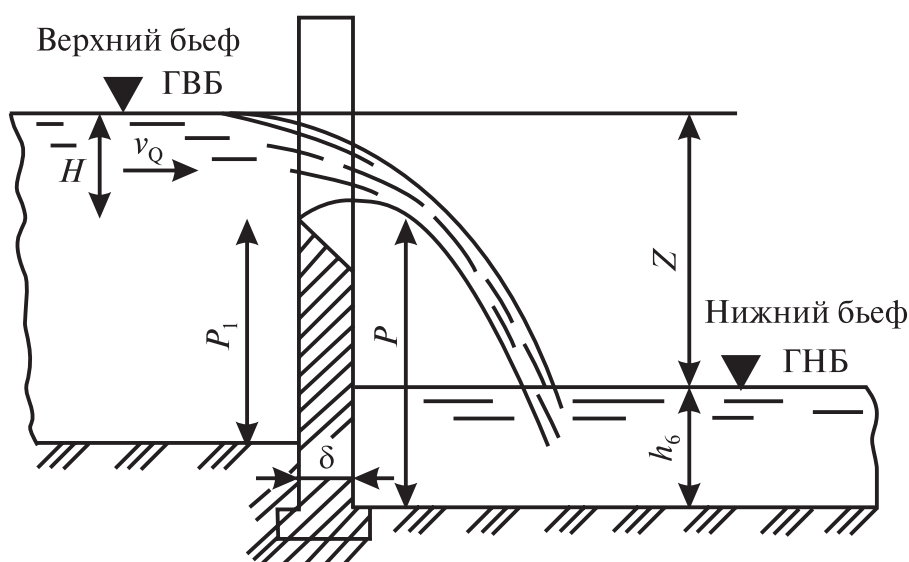


Рис. 2.24. Схема истечения через водослив с тонкой стенкой

По форме выреза отверстия водосливы подразделяются на треугольные, прямоугольные, трапециевидные и др. По условиям бокового сужения потока они делятся на водосливы с боковым сужением (ширина водослива меньше ширины русла) и водосливы без бокового сужения (ширина водослива равна ширине русла).

По гидравлическому режиму работы водосливы могут быть незатопленными и затопленными. Если отметка уровня воды нижнего бьефа ГНБ ниже отметки уровня верхнего бьефа ГВБ, режим называется незатопленным, и наоборот.

2.5.2. Водослив как гидрометрическое устройство

Для измерения расхода воды обычно применяются незатопленные водосливы.

Основной формулой при определении расходов воды для всех видов водосливов является следующая:

$$Q = \mu_b b \sqrt{2g} \cdot H^{3/2}, \quad (2.24)$$

где Q – расход воды, м³/с; μ_b – коэффициент расхода водослива; b – ширина водослива, м; g – ускорение свободного падения, равное 9,81, м/с²; H – напор на гребне водослива, м [3].

Водосливы с тонкой стенкой выполняются с треугольным (для замера малых расходов) или прямоугольным (для замера больших расходов) вырезом. При расходах воды $Q \leq 200$ л/с (малых) чаще всего применяется водослив с треугольным вырезом при величине угла выреза $\alpha = 90^\circ$ (рис. 2.25).



Рис. 2.25. Водослив с треугольным вырезом гидрологического поста на ручье без названия в г. п. Нарочь

При таком угле ширина $b = 2H$, а коэффициент расхода является постоянной величиной ($\mu_b = 0,316$). При этом формула (2.24) приводится к частному виду

$$Q = 1,4 \cdot H^{2,5}. \quad (2.25)$$

Таким водосливом удобно пользоваться для измерений расхода в гидравлическом лотке, в особенности если по этой формуле построить график $Q = f(H)$.

Водосливы с прямоугольным вырезом в тонкой стенке применяются при значительных расходах ($Q > 200$ л/с). Коэффициент расхода μ_b для незатопленного водослива с прямоугольным вырезом при отсутствии бокового сужения колеблется от 0,41 до 0,50.

Водосливы с широким порогом (при $\delta \geq 2H$) в основном применяются в качестве водосливных плотин с низким напором (рис. 2.26).

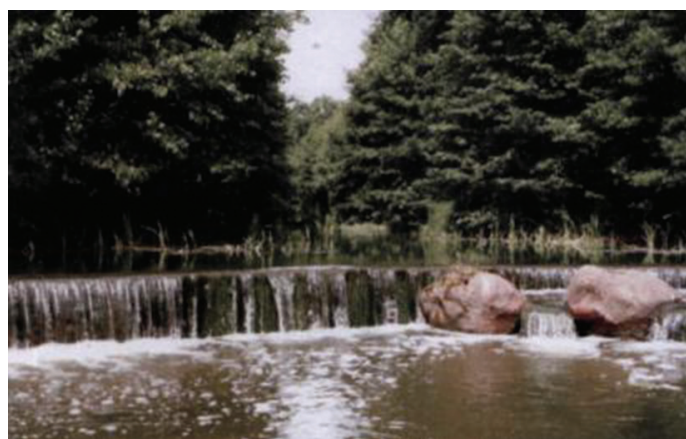


Рис. 2.26. Водосливная плотина водохранилища Дрозды

Широкий порог водослива (тело водослива) стесняет поток в русле, из-за чего скорость течения (подхода) к нему увеличивается (рис. 2.27). Коэффициент расхода μ_b при этом изменяется в пределах от 0,30 до 0,38. Водослив с широким порогом применяется, в частности, для тарировки турбинных трактов в целях определения расходов воды на водпостах, приуроченных к ГЭС. В Беларуси такой водомерный пост Белгидромета функционирует на р. Друть при Чигиринской ГЭС.

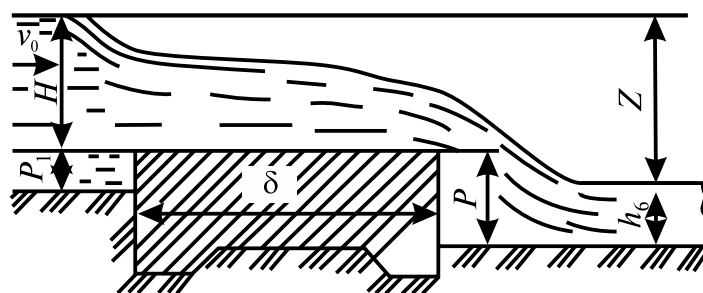


Рис. 2.27. Схема истечения через водослив с широким порогом

В практике гидротехнического строительства широкое применение находят водосливы *практического профиля* (рис. 2.28), сливная поверхность которых выполняется в виде плавно изменяющейся формы. При этом учитываются не только условия протекания, но и прочности и устойчивости при воздействии водных потоков, когда величина напора значительна. Это достигается в результате увеличения толщины и изменения формы поперечного сечения. Коэффициент расхода для таких водосливов μ_b изменяется в широких пределах – от 0,3 до 0,6.

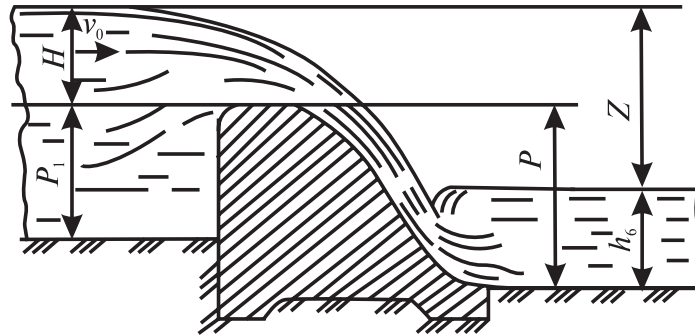


Рис. 2.28. Схема истечения через водослив практического профиля

В заключение следует отметить, что каждый из всех типов водосливов имеет свои особенности, и исходя из их проектных параметров расходы воды определяются согласно рекомендациям и справочникам по гидравлическим расчетам водосливов [11, 21].

Пример 2.8

Определить расход воды ручья без названия на водпосту Купа, бассейн оз. Нарочь (см. рис. 2.27), по установленному тонкостенному треугольному водосливу ($\alpha = 90^\circ$). Напор на гребне водослива во время наблюдений $H = 0,10$ м.

Решение. Для определения расхода воды используем формулу (2.25):

$$Q = 1,4 \cdot H^{2,5} = 1,4 \cdot 0,1^{2,5} = 0,0044 \text{ м}^3/\text{с} = 4,4 \text{ л/с.}$$

По данным издания «Гидрологический ежегодник» максимальный напор H на установленном водосливе составляет 0,46 м, а максимальная пропускная способность $Q = 201$ л/с. Проверим справедливость формулы (2.25):

$$Q = 1,4 \cdot H^{2,5} = 1,4 \cdot 0,46^{2,5} = 0,201 \text{ м}^3/\text{с} = 201 \text{ л/с.}$$

Правильность расчетов подтверждена. По данным многолетних наблюдений максимальный расход воды на данном водпосту составил 79 л/с, что находится в пределах максимальной пропускной способности установленного водослива.

2.5.3. Сопряжение бьефов и сопрягающие сооружения

При возведении плотин и других подпорных сооружений на водотоках возникает необходимость произвести сопряжение отдельных участков потоков, находящихся на разных уровнях, или соединить участки водотоков, имеющих уклоны меньше критических, с участками, уклоны которых значительно превышают критические, т. е. $i > i_k$ (рис. 2.29).

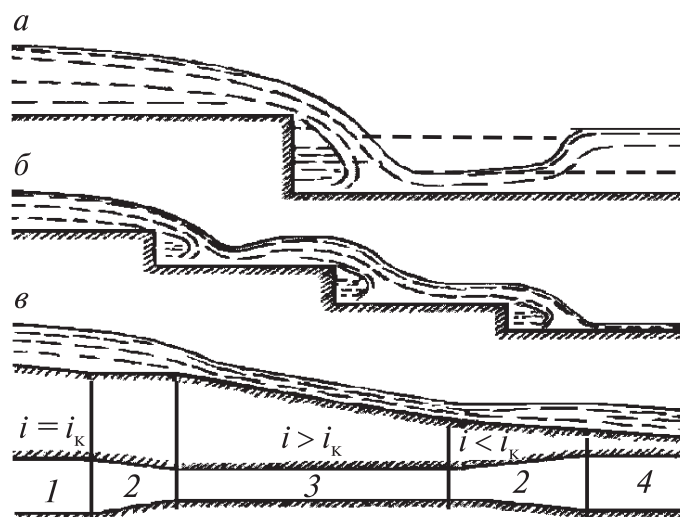


Рис. 2.29. Сопрягающие сооружения:
а – одноступенчатый перепад; б – многоступенчатый перепад; в – быстроток:
1 – подводящее русло; 2 – переходные участки;
3 – собственно быстроток; 4 – отводящее русло

Участок водотока перед подпорным сооружением, например плотиной, водопропускной трубой, с верховой его стороны называется верхним бьефом, а за сооружением с низовой стороны – нижним бьефом (рис. 2.30).



Рис. 2.30. Нижний бьеф одной из плотин каскада Слепянской водной системы, г. Минск

Падая с большой высоты, поток в нижнем бьефе водосливной плотины или в конце быстротока приобретает большую скорость, а его живое сечение с увеличением скорости уменьшается и у дна нижнего бьефа становится минимальным.

Поток в бурном состоянии обладает большой кинетической энергией, а следовательно, и большой размывающей способностью. Такой поток, взаимодействуя с руслом, может вызвать значительные его деформации и привести к подмыву самого сооружения.

Порядок гидравлических расчетов сопрягающих сооружений (перепадов и быстротоков) и устройств для гашения энергии потока в нижних бьефах сооружений приводится в справочной литературе по гидравлике.

3. ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ

3.1. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ИНЖЕНЕРНОЙ ГИДРОЛОГИИ

Инженерная гидрология – совокупность областей гидрологии суши, связанных с практическим применением результатов гидрологических исследований при решении инженерных водохозяйственных задач.

Водное хозяйство – отрасль народного хозяйства, в задачи которой входят учет, изучение и комплексное использование поверхностных и подземных вод, включая охрану вод и борьбу с ущербом, причиняемым народному хозяйству наводнениями, а также вопросы водного права.

Ресурсы поверхностных вод Беларуси в средний по водности год составляют 57,9 км³/год, из них ресурсы местного стока – 34,0 км³/год, транзитного стока, поступающего с территорий сопредельных государств, – 23,9 км³/год. По последним официальным данным годовой объем водопотребления всеми отраслями народного хозяйства в среднем составляет около 1,6 млн м³ свежей воды, в том числе 0,7 млн м³ – из поверхностных источников и 0,9 млн м³ – из подземных. Годовой объем водоотведения превышает 1,0 млн м³ сточных вод. Таким образом, безвозвратное водопотребление составляет 0,6 млн м³ в год.

Водное хозяйство Республики Беларусь охватывает следующие основные направления, или отрасли:

- проектирование объектов водохозяйственного и гидротехнического строительства;
- водоснабжение и очистка сточных вод: обеспечение населенных мест, промышленных и транспортных предприятий водой надлежащего качества и в необходимом количестве, а также очистка и отвод сточных и отработанных вод;
- гидроэнергетика – строительство сооружений, в которых энергия падающей воды преобразуется в механическую, а затем в электрическую;
- гидромелиорация – использование воды для орошения земель, отвод избыточных поверхностных и подземных вод с территории (осушение), мероприятия по борьбе с подтоплением земель, эрозией почв и т. п.;

- рыбное хозяйство — освоение водохранилищ, строительство и реконструкция прудов и водоемов специального назначения, пропуск рыбы через гидроузлы при помощи рыбопропускных сооружений;
- водный транспорт — использование рек, озер, водохранилищ для судоходства и лесосплава;
- рекреация — строительство вдоль рек и водоемов объектов для отдыха и туризма;
- охрана водных ресурсов от загрязнения отходами промышленности и сельского хозяйства, нерационального использования и др.;
- составление бассейновых схем комплексного использования и охраны водных ресурсов (СКИОВР).

Схемы комплексного использования и охраны вод, или СКИОВР, — систематизированные материалы исследований и проектных разработок о состоянии, перспективном использовании и охране поверхностных и подземных вод, разрабатываются в целях определения водохозяйственных и иных мероприятий для удовлетворения перспективных потребностей населения и хозяйственной деятельности в водных ресурсах, обеспечения рационального использования и охраны вод, а также для предотвращения и ликвидации вредного воздействия вод.

Согласно Водному кодексу Республики Беларусь 2014 г. [13] СКИОВР, утвержденные и разработанные до вступления в силу, действуют до утверждения соответствующих планов управления речными бассейнами.

Для рационального использования водных ресурсов республики на водных объектах необходимо обоснованное проектирование гидротехнических и других сооружений в соответствии с инженерно-гидрологическими расчетами и изысканиями.

3.2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

3.2.1. Понятие и назначение гидрологических расчетов

Основной задачей инженерной гидрологии является расчет параметров гидрологического режима с оценкой вероятности их появления для проектирования гидротехнических и других сооружений, связанных с водными объектами (мосты, трубопроводы, ЛЭП и др.).

Определение расчетных гидрологических характеристик основывается на данных гидрометеорологических наблюдений, опубликованных в специальных документах (гидрологические ежегодники, справочники, монографии).

Систематические наблюдения за гидрологическим режимом в Беларуси проводятся с 1870-х гг. и по состоянию на 1 января 2017 г. осуществляются на 109 постах, из них 99 постов – на водотоках и 10 – на водоемах.

Кроме того, насчитывается еще около 150 постов (закрытых по разным причинам), на которых в свое время проводились регулярные наблюдения. Эти весьма ценные данные должны включаться в обработку при гидрологических обобщениях и максимально использоваться при проведении инженерно-гидрологических изысканий.

Методы гидрологических расчетов в настоящем разделе изложены на основе последних рекомендаций и указаний, содержащихся в нормативных документах. С 1 июля 2010 г. в Республике Беларусь введен в действие технический кодекс установившейся практики проектирования (ТКП) по гидрологическим расчетам: «Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. ТКП 45-3.04-168-2009 (02250)» [8].

Технический кодекс устанавливает порядок определения расчетных гидрологических характеристик при проектировании: речных гидротехнических сооружений, железных и автомобильных дорог, сооружений мелиоративных систем, систем водоснабжения, планировки и застройки населенных пунктов, генеральных планов промышленных и сельскохозяйственных предприятий, а также порядок разработки природоохранных, противопаводковых мероприятий и схем комплексного использования и охраны водных ресурсов (или планов управления речными бассейнами) на территории Республики Беларусь.

Согласно техническому кодексу «Расчетные гидрологические характеристики» к основным гидрологическим характеристикам относятся:

- расход воды Q , м³/с;
- объем стока воды W , м³;
- модуль стока воды q , л/(с · км²);
- слой стока воды h , мм;
- уровень воды H , см.

При определении расчетных гидрологических характеристик в зависимости от наличия гидрологической информации необходимо применять следующие *методы расчетов* [7, 8]:

- при наличии данных гидрометрических наблюдений достаточной продолжительности – непосредственно по этим данным;
- при недостаточности данных гидрометрических наблюдений – приведением их к многолетнему периоду с использованием данных рек-аналогов с более длинными рядами наблюдений;

- при отсутствии данных гидрометрических наблюдений – по формулам с применением данных рек-аналогов или интерполяцией по картам стока, основанным на совокупности данных наблюдений всей сети гидрометрических станций и постов конкретного гидрологического района.

3.2.2. Расчеты стока при наличии данных наблюдений. Кривая обеспеченности

При наличии данных гидрометрических наблюдений достаточной продолжительности определение расчетных гидрологических характеристик стока (годового, максимального, минимального и др.) осуществляется путем применения *кривых распределения вероятностей превышения* – кривых обеспеченности.

Кривая обеспеченности – графическое или аналитическое выражение функции, характеризующей вероятность появления того или иного значения рассматриваемого ряда случайной величины.

Гидрологические расчеты следует проводить по *однородным рядам наблюдений*. Нарушение однородности рядов стока может происходить в результате изменения естественных факторов формирования гидрологического режима (переброска стока, строительство гидроузлов, водохранилищ и т. д.) [1, 17].

Оценка репрезентативности (представительности, или достаточной продолжительности) гидрологического ряда за рассматриваемый период осуществляется непосредственно при расчетах.

Рассмотрим порядок гидрологических расчетов на примере *годового стока* – важнейшей характеристики гидрологического режима. Для примера заранее выбран однородный ряд годового стока р. Друть – д. Румок за 1936–1960 гг. Водпост был закрыт в 1961 г. после создания Чигиринского водохранилища.

При гидрологических расчетах вначале выполняется построение *кривой обеспеченности на клетчатке вероятностей*. Обеспеченность (вероятность превышения) величины годового стока (или любой другой гидрологической характеристики) – это вероятность того, что рассматриваемое значение может быть превышено в совокупности всех ее возможных значений за рассматриваемый период.

Для построения эмпирической кривой обеспеченности вычисляются ее статистические параметры (табл. 3.1). Члены исходного хронологического

ряда наблюдений (графа 3) в графе 4 располагаются в порядке убывания. При этом эмпирическая вероятность (графа 5) определяется по формуле

$$P_m = \frac{m}{n+1} 100, \quad (3.1)$$

где P_m – эмпирическая ежегодная вероятность превышения годового стока, %; m – порядковый номер членов ряда годового стока, расположенных в убывающем порядке; n – количество членов ряда.

Для сглаживания и экстраполяции эмпирических кривых обеспеченности в условиях Беларуси, как правило, применяется аналитическая кривая трехпараметрического гамма-распределения Крицкого – Менкеля. При надлежащем обосновании применяются и другие функции распределения вероятностей – биномиальная (кривая Пирсона III типа) и др. [7, 8].

Статистическими параметрами теоретической кривой обеспеченности (аналитической кривой распределения) являются:

- среднее многолетнее значение годового стока \bar{Q} ; в расчетных формулах, приведенных ниже, величины годового стока выражены в виде расходов воды ($\text{м}^3/\text{с}$);
- коэффициент вариации, или изменчивости, C_v ;
- коэффициент асимметрии C_s .

Таблица 3.1

Вычисление параметров кривой обеспеченности среднегодовых расходов воды р. Друть – д. Румок методом моментов. Площадь водосбора 4650 км²

№ члена ряда	Год	Q_i , м ³ /с	В убывающем порядке					
			Q_i , м ³ /с	P , %	k_i	k_{i-1}	$(k_{i-1})^2$	$(k_{i-1})^3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1936	31,2	50,9	4,5	1,77	0,77	0,593	0,456
2	1937	22,0	41,4	9,1	1,44	0,44	0,194	0,085
3	1938	23,0	37,4	13,6	1,30	0,30	0,090	0,027
4	1939	22,0	36,1	18,2	1,25	0,25	0,062	0,016
5	1940	33,0	33,0	22,7	1,15	0,15	0,022	0,003
6	1945	32,4	32,4	27,3	1,13	0,13	0,017	0,002
7	1946	36,1	31,9	31,8	1,11	0,11	0,012	0,001
8	1947	37,4	31,2	36,3	1,08	0,08	0,006	0,001
9	1948	25,4	30,2	40,9	1,05	0,05	0,002	0,000

№ члена ряда	Год	Q_i , м ³ /с	В убывающем порядке					
			Q_i , м ³ /с	P , %	k_i	k_i-1	$(k_i-1)^2$	$(k_i-1)^3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	1949	29,8	29,8	45,5	1,04	0,03	0,001	0,000
11	1950	20,8	25,5	50,0	0,89	-0,11	0,012	-0,001
12	1951	30,2	25,4	54,5	0,88	-0,12	0,014	-0,002
13	1952	23,7	24,9	59,1	0,86	-0,14	0,020	-0,003
14	1953	31,9	23,7	63,6	0,82	-0,18	0,032	-0,006
15	1954	16,0	23,1	68,2	0,80	-0,20	0,040	-0,008
16	1955	22,8	23,0	72,7	0,80	-0,20	0,040	-0,008
17	1956	41,4	22,8	77,3	0,79	-0,21	0,044	-0,009
18	1957	24,9	22,0	81,8	0,76	-0,24	0,058	-0,014
19	1958	50,9	22,0	86,4	0,76	-0,24	0,058	-0,014
20	1959	23,1	20,8	90,9	0,72	-0,28	0,078	-0,022
21	1960	25,5	16,0	95,5	0,56	-0,44	0,194	-0,085
Σ	—	603,5	603,5	—	—	—	1,589	0,419

Величина среднего многолетнего значения годового стока вычисляется как

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{n}, \quad (3.2)$$

где Q_i – средний годовой расход воды (м³/с) с порядковым номером i ; n – количество лет наблюдений. В нашем примере

$$\bar{Q} = 603,5 : 21 = 28,7 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Коэффициенты вариации и асимметрии теоретической кривой обеспеченности устанавливаются одним из следующих методов: методом моментов, методом наибольшего правдоподобия, графоаналитическим или графическим методом.

В условиях Беларуси при значениях $C_v \leq 0,6$ наиболее часто используется *метод моментов*. Он рекомендуется также как метод, наиболее наглядный для учебного процесса. Значения C_v и C_s при этом определяются по формулам

$$C_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - 1)^2}{n - 1}}, \quad (3.3)$$

$$C_s = \frac{n \sum_{i=1}^n (k_i - 1)^3}{C_v^3 (n-1)(n-2)}, \quad (3.4)$$

где k_i – модульный коэффициент годового стока, рассчитанный по формуле

$$k_i = \frac{Q_i}{\bar{Q}}. \quad (3.5)$$

Промежуточные результаты расчетов для последующего определения C_v и C_s по формулам (3.3)–(3.5) заносятся в табл. 3.1 (графы 6–9).

Величины относительных средних квадратических погрешностей σ (%) статистических параметров теоретической кривой обеспеченности определяются по формулам

$$\sigma_{\bar{Q}} = \pm \frac{C_v}{\sqrt{n}} 100, \quad (3.6)$$

$$\sigma_{C_v} = \sqrt{\frac{1+C_v^2}{2n}} 100, \quad (3.7)$$

$$\sigma_{C_s} = \frac{100}{C_s} \sqrt{\frac{6}{n} (1+6C_v^2+5C_v^4)}. \quad (3.8)$$

Длина ряда считается достаточной (репрезентативной), если величина $\sigma_{\bar{Q}} \leq 10\%$. Чем больше коэффициент вариации, тем больше должен быть период наблюдений, удовлетворяющий этому условию.

В представленном примере $\sigma_{\bar{Q}} = 6,1\%$, т. е. ряд является *репрезентативным*. Если относительная средняя квадратическая погрешность $\sigma_{\bar{Q}} > 10\%$ (т. е. период наблюдений нерепрезентативен), необходимо осуществлять приведение рассматриваемой гидрологической характеристики к многолетнему периоду согласно требованиям, предъявляемым к расчетам *при недостаточности данных гидрометрических наблюдений* (см. ниже п. 3.2.3). Опыт показал, что при расчетах годового стока рек Беларуси в большинстве случаев достаточной считается продолжительность периода наблюдений 18–20 лет, т. е. когда выполняется условие $\sigma_{\bar{Q}} \leq 10\%$.

Для сглаживания и экстраполяции кривых обеспеченности применяется трехпараметрическое гамма-распределение при соотношениях

$C_s/C_v = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; \dots 6,0$. При $C_s = 2C_v$ кривая трехпараметрического гамма-распределения совпадает с биномиальной кривой, а при $C_s = 0$ (нормальное распределение) на клетчатке вероятностей с умеренной асимметричностью она принимает вид прямой линии.

Кривые обеспеченности основных гидрологических характеристик в условиях Беларуси имеют *положительную асимметрию*. Из-за больших ошибок величин C_s (в нашем случае $\sigma_{C_s} = 61,8\%$), особенно для рядов с относительно малым числом членов ($n < 50$), в расчетах допускается (при достаточном обосновании) принимать районные осредненные соотношения C_s / C_v или использовать набор клетчаток вероятности при различном соотношении C_s / C_v , где кривая обеспеченности принимает вид прямой линии.

Для построения аналитической кривой используются таблицы ординат кривой обеспеченности (квантилей), представленных в виде модульных коэффициентов k_p для рассчитанных величины C_v и соотношения C_s / C_v (прил. 1). Соотношение C_s / C_v округляется с точностью до 0,5. В нашем примере соотношение $C_s / C_v = 1,06/0,28 \approx 4,0$.

В случае если значение не совпадает с табличным (т. е. кратным 0,1), величину k_p следует находить интерполяцией между соседними значениями C_v . Абсолютные ординаты кривой обеспеченности определяются по формуле

$$Q_p = \bar{Q}k_p, \quad (3.9)$$

где Q_p – величина расхода воды ($\text{м}^3/\text{с}$) расчетной обеспеченности (%).

По вычисленным ординатам составляется табл. 3.2.

Таблица 3.2

Ординаты аналитической кривой обеспеченности среднегодовых расходов

р. Друть – д. Румок, рассчитанные по методу моментов

$$\bar{Q} = 28,7 \text{ м}^3/\text{с}; C_v = 0,28; = C_s / C_v, 4,0$$

$P, \%$	1	5	10	25	50	75	95	99
k_p	1,87	1,52	1,36	1,15	0,955	0,802	0,633	0,540
$Q_p, \text{м}^3/\text{с}$	53,7	43,6	39,0	33,0	27,4	23,0	18,2	15,5

Затем на клетчатку вероятностей наносятся эмпирические точки и строится аналитическая (теоретическая) кривая обеспеченности (рис. 3.1).

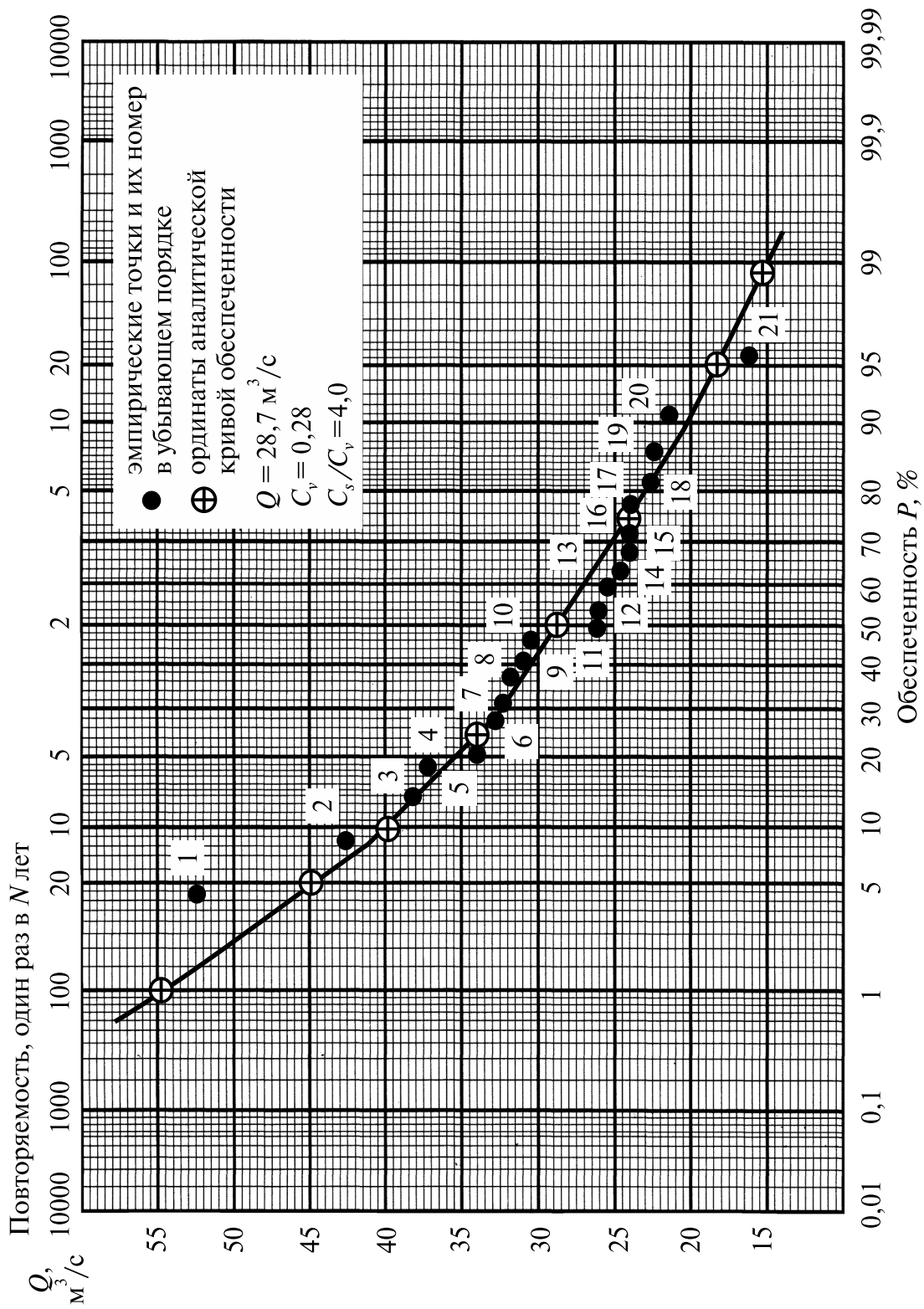


Рис. 3.1. Кривая обеспеченности среднегодовых расходов воды ($Q, \text{ м}^3/\text{с}$)
 р. Друть — д. Румок (1936–1960 гг.)

Перечень числовых значений *расчетных обеспеченностей*, для которых необходимо рассчитать величину среднего годового расхода воды (или любой другой гидрологической характеристики), назначается согласно утвержденным нормативным документам для каждого вида строительства.

Повторяемостью гидрологической величины (например, среднего годового стока и др.), которая приведена на верхней шкале клетчатки вероятностей, называется число лет N , в течение которых данная величина случается в среднем один раз. При обеспеченности $P \leq 50 \%$ число лет $N = 100 / P$, при $P > 50 \%$ число лет $N = 100 / (100 - P)$.

Асимметричная кривая обеспеченности имеет характерные точки: a — центр распределения — точка, соответствующая средней арифметической величине гидрологического ряда; b — медиана — значение переменной, ордината которой соответствует обеспеченности $P = 50 \%$.

На симметричных кривых обеспеченности (при $C_s = 0$) эти характерные точки совпадают, а кривая обеспеченности приобретает вид прямой линии.

Таким образом, рассмотрен первый, важнейший этап — расчет гидрологических характеристик при наличии данных наблюдений. С каждым годом длина гидрологических рядов увеличивается, и при обработке (пересчете) обновленных рядов точность гидрологических расчетов повышается.

В условиях Беларуси длина репрезентативного ряда (для годового стока), как правило, должна составлять не менее 18–20 лет (репрезентативность каждого конкретного ряда определяется расчетами). Гидрологические ряды постов, открытых за последние 20–30 лет, становятся репрезентативными, а гидрологические ряды закрытых постов следует проверять на репрезентативность и при необходимости использовать при инженерно-гидрологических расчетах.

Периодически, каждые 5–10 лет, в системе Белгидромета гидрологические характеристики обновляются и переиздаются в электронном виде. Непосредственно при проектировании к обработке привлекаются обновленные гидрологические ряды, включая год, предшествующий началу изысканий, для чего заинтересованные научные и проектные организации заказывают необходимую информацию в системе Белгидромета.

3.2.3. Расчеты стока при недостаточности данных наблюдений

При недостаточности данных гидрометрических наблюдений осуществляется приведение статистических параметров стока в расчетном створе к многолетнему периоду с привлечением данных соседних рек-аналогов, имеющих сравнительно длительный, т. е. репрезентативный, период наблюдений. Оно основывается на статистической (регрессионной) связи параметров стока соседних рек, имеющих сходные физико-географические характеристики водосборов.

Приведение статистических параметров стока в расчетном створе к многолетнему периоду осуществляется с применением уравнения регрессии при соблюдении следующих условий [8]:

$$n' \geq (6 \div 10); r \geq 0,7; k_1 / \sigma_{k_1} \geq 2, \quad (3.10)$$

где n' – число лет совместных наблюдений в расчетном (приводимом) створе и створе-аналоге; r – коэффициент корреляции между значениями стока в расчетном створе и створе-аналоге; k_1 – коэффициент регрессии; σ_{k_1} – среднее квадратическое отклонение (ошибка) коэффициента регрессии.

Уравнение регрессии с двумя переменными имеет следующий вид:

$$Q = k_0 + k_1 Q_a, \quad (3.11)$$

где Q и Q_a – расходы воды соответственно в расчетном створе и створе-аналоге; k_0 – свободный член уравнения регрессии; k_1 – коэффициент регрессии (угловой коэффициент прямой, выражающей зависимость расходов воды в расчетном створе и створе-аналоге).

Соответственно параметры k_0 и k_1 определяются по формулам

$$k_0 = \bar{Q} - k_1 \bar{Q}_a, \quad (3.12)$$

$$k_1 = r \frac{\sigma_Q}{\sigma_{Q_a}}, \quad (3.13)$$

где \bar{Q} и \bar{Q}_a – средние годовые значения расходов воды соответственно в расчетном створе и створе-аналоге; σ_Q и σ_{Q_a} – средние квадратические отклонения годовых расходов воды в этих створах, определяемые по формулам

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n'} (Q_i - \bar{Q})^2}{n' - 1}}, \quad (3.14)$$

$$\sigma_{Q_a} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n'} (Q_{ai} - \bar{Q}_a)^2}{n' - 1}}, \quad (3.15)$$

где Q_i и Q_{ai} – годовичные значения среднегодовых расходов воды соответственно в расчетном створе и створе-аналоге.

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})(Q_{ai} - \bar{Q}_a)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{ai} - \bar{Q}_a)^2}}. \quad (3.16)$$

Ошибка коэффициента регрессии определяется как

$$\sigma_{k_1} = \frac{\sigma_Q}{\sigma_{Q_a}} \sqrt{\frac{1 - r^2}{n' - 1}}. \quad (3.17)$$

Все промежуточные расчеты параметров уравнения регрессии заносятся в табл. 3.3 (см. пример 3.1).

При наличии нескольких рек-аналогов для приведения используются данные того аналога, с которым связь величин стока наиболее тесная и продолжительность периода наибольшая. После выбора реки-аналога параметры стока в расчетном створе определяются двумя способами:

1) непосредственно по уравнению регрессии (3.11) с использованием данных реки-аналога. При этом коэффициент вариации C_v в расчетном створе определяется по формуле

$$C_v = k_1 \frac{\bar{Q}_a}{\bar{Q}} C_{v_a}, \quad (3.18)$$

где C_{v_a} – коэффициент вариации годового стока реки-аналога.

Соотношение C_s / C_v принимается равным соотношению в створе-аналоге;

2) удлинением ряда стока в расчетном створе по створу-аналогу с использованием уравнения регрессии и последующей статистической обработкой полученного ряда (включающего как наблюдаемые,

так и восстановленные значения стока) изложенными выше методами. Подробные указания по применению этого способа содержатся в [7].

Пример 3.1

Определить величину среднего годового расхода воды ($\text{м}^3/\text{с}$), приведенного к многолетнему (репрезентативному) периоду, и годовых расходов воды обеспеченности 5, 10, 25, 50 и 95 % в расчетном створе р. Неман – д. Ерши (площадь водосбора $F = 2510 \text{ км}^2$), имеющему недостаточную длину ряда наблюдений (10 лет, 1931–1940 гг.) с использованием данных створа-аналога р. Неман – г. Гродно (площадь водосбора $F = 33\,600 \text{ км}^2$), имеющего длительный (репрезентативный) период наблюдений со следующими параметрами:

$$\bar{Q}_a = 197 \text{ м}^3/\text{с}; C_v = 0,19; C_s / C_v = 4,0.$$

Расчет производится в следующем порядке.

1. Приведение статистических параметров стока в расчетном створе к многолетнему периоду осуществляется с применением уравнения регрессии при соблюдении условий (3.10), заключающихся в следующем: $n' \geq (6 \div 10)$; $r \geq 0,7$; $k_1 / \sigma_{k_1} \geq 2$. Поскольку длина ряда составляет 10 лет, первое условие $n' \geq (6 \div 10)$ выполнено.

2. Промежуточные результаты расчетов для последующего определения коррелятивной связи и параметров уравнения регрессии заносятся в табл. 3.3.

Таблица 3.3

К определению коррелятивной связи и параметров уравнения регрессии средних годовых расходов воды ($\text{м}^3/\text{с}$) в расчетном створе р. Неман – д. Ерши (Q) и в створе-аналоге р. Неман – г. Гродно (Q_a)

№ п/п	Годы	Q_i	Q_{ai}	$Q_i - \bar{Q}$	$Q_{ai} - \bar{Q}_a$	$(Q_i - \bar{Q})^2$	$(Q_{ai} - \bar{Q}_a)^2$	$(Q_i - \bar{Q}) \times (Q_{ai} - \bar{Q}_a)$
1	1931	25,7	295	6,8	69	46,24	4761	469,2
2	1932	21,5	257	2,6	31	6,76	961	80,6
3	1933	23,9	213	5,0	-13	25,00	169	-65,0
4	1934	18,1	236	-0,8	10	0,64	100	-8,0
5	1935	15,7	227	-3,2	1	10,24	1	-3,2
6	1936	21,9	254	3,0	28	9,00	784	84
7	1937	17,4	205	-1,5	-21	2,25	441	31,5
8	1938	12,7	171	-6,2	-55	38,44	3 025	341,0

№ п/п	Годы	Q_i	Q_{ai}	$Q_i - \bar{Q}$	$Q_{ai} - \bar{Q}_a$	$(Q_i - \bar{Q})^2$	$(Q_{ai} - \bar{Q}_a)^2$	$(Q_i - \bar{Q}) \times$ $\times (Q_{ai} - \bar{Q}_a)$
9	1939	14,7	181	-4,2	-45	17,64	2 025	189,0
10	1940	17,5	216	-1,4	-10	1,96	100	14,0
Σ	–	189,1	2 255	–	–	158,17	12 367	1133,1
Ср.	–	18,9	226	–	–	–	–	–

П р и м е ч а н и е. Условия (3.10) применения уравнения регрессии:

$$n' \geq (6 \div 10); r \geq 0,7; k_1 / \sigma_{k_1} \geq 2.$$

$$n' = 10; r = 0,81; k_1 / \sigma_{k_1} = 4,18.$$

Уравнение регрессии (3.11): $Q = k_0 + k_1 Q_a$; $Q = -1,8 + 0,092 Q_a$.

3. По формуле (3.16) определим коэффициент корреляции r :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n'} (Q_i - \bar{Q})(Q_{ai} - \bar{Q}_a)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n'} (Q_i - \bar{Q})^2 \sum_{i=1}^{n'} (Q_{ai} - \bar{Q}_a)^2}} = \frac{1133,1}{\sqrt{158,17 \cdot 12\,367}} = 0,81.$$

Таким образом, второе условие $r \geq 0,7$ выполнено.

4. По формулам (3.14) и (3.15) определим средние квадратические отклонения годовых расходов воды σ_Q и σ_{Q_a} соответственно в расчетном створе (р. Неман – д. Ерши) и створе-аналоге (р. Неман – г. Гродно):

$$\sigma_Q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n'} (Q_i - \bar{Q})^2}{n' - 1}} = \sqrt{\frac{158,17}{9}} = 4,192 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\sigma_{Q_a} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n'} (Q_{ai} - \bar{Q}_a)^2}{n' - 1}} = \sqrt{\frac{12\,367}{9}} = 37,07 \text{ м}^3/\text{с}.$$

5. По формуле (3.13) определим коэффициент регрессии k_1 :

$$k_1 = r \frac{\sigma_Q}{\sigma_{Q_a}} = 0,81 \frac{4,192}{37,07} = 0,092.$$

6. По формуле (3.12) рассчитаем параметр k_0 :

$$k_0 = \bar{Q} - k_1 \bar{Q}_a = 18,9 - 0,0916 \cdot 226 = -1,8.$$

7. Составим уравнение регрессии (2.13):

$$Q = k_0 + k_1 Q_a, \text{ т. е. } Q = -1,8 + 0,092 Q_a.$$

8. По формуле (3.17) определим ошибку коэффициента регрессии σ_{k_1} :

$$\sigma_{k_1} = \frac{\sigma_Q}{\sigma_{Q_a}} \sqrt{\frac{1-r^2}{n'-1}} = \frac{4,192}{37,07} \sqrt{\frac{1-0,81^2}{9}} = 0,022.$$

9. Определим соотношение: $k_1 / \sigma_{k_1} = 0,092 / 0,022 = 4,18$.

Таким образом, соотношение $k_1 / \sigma_{k_1} \geq 2$, т. е. третье из условий (3.10), выполнено.

10. Полученное уравнение регрессии используется для построения графика связи и определения среднего годового расхода воды, приведенного к многолетнему (репрезентативному) периоду:

$$\bar{Q} = -1,8 + 0,092 \bar{Q}_a = -1,8 + 0,092 \cdot 197 = 16,3 \text{ м}^3/\text{с}.$$

11. Коэффициент вариации C_v определяется по формуле (3.18):

$$C_v = k_1 \frac{\bar{Q}_a}{\bar{Q}} C_{v_a} = 0,092 \frac{197}{16,3} 0,19 = 0,21.$$

12. Соотношение C_s / C_v принимается равным соотношению в створе-аналоге р. Неман – г. Гродно: $C_s = 4,0 C_v$.

13. Используя таблицу ординат k_p (см. прил. 1) при $C_v = 0,21$ и $C_s = 4,0 C_v$, по формуле (3.9) рассчитаем средние годовые расходы воды заданной обеспеченности Q_p (табл. 3.4) в расчетном створе р. Неман – д. Ерши.

Таблица 3.4

Расчетные характеристики средних годовых расходов воды р. Неман – д. Ерши

$$\bar{Q} = 16,2 \text{ м}^3/\text{с}; C_v = 0,21; C_s / C_v = 4,0$$

$P, \%$	5	10	25	Среднее	50	75	95
k_p	1,38	1,27	1,12	1,00	0,973	0,851	0,708
$Q_p = \bar{Q} k_p, \text{ м}^3/\text{с}$	22,5	20,7	18,3	16,3	15,9	13,9	11,5

14. Используя исходные данные табл. 3.5, для проверки нанесем на график контрольные точки, соответствующие равнообеспеченным значениям Q и Q_a (рис. 3.2).

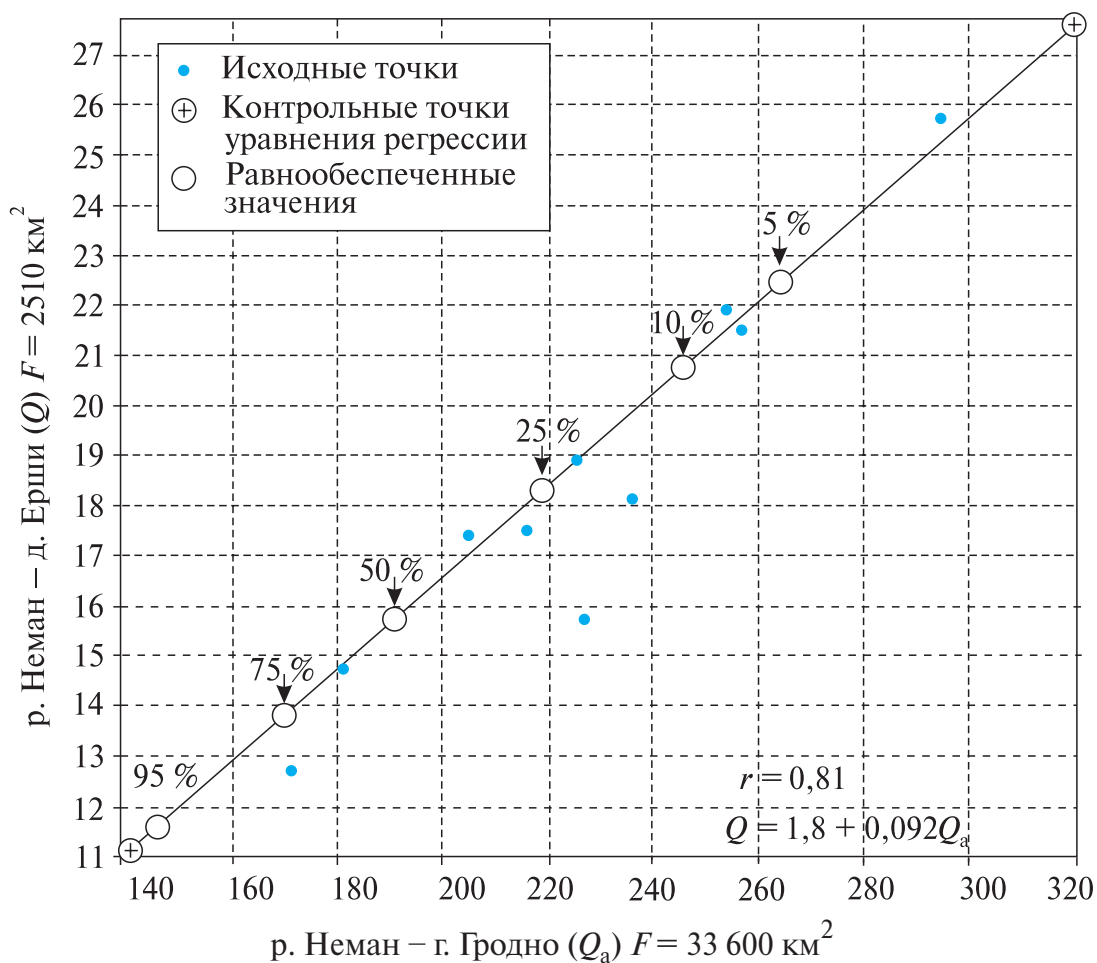


Рис. 3.2. График связи средних годовых расходов воды ($\text{м}^3/\text{с}$) р. Неман – г. Гродно (Q_a) и р. Неман – д. Ерши (Q)

Таблица 3.5

Расчетные характеристики средних годовых расходов воды р. Неман – г. Гродно (контрольный створ-аналог) $\bar{Q} = 197 \text{ м}^3/\text{с}$; $C_v = 0,19$; $C_s/C_v = 4,0$

$P, \%$	5	10	25	Среднее	50	75	95
k_p	1,35	1,25	1,10	1,00	0,97	0,86	0,75
$Q_p = \bar{Q}k_p, \text{ м}^3/\text{с}$	266	246	217	197	191	170	148

Как видно из графика, результаты расчетов показали их хорошую сходимость.

При расчете статистических параметров средних годовых расходов воды (или другой гидрологической характеристики) привлекаются данные водпостов (закрытых или недавно открытых) с продолжительностью совместных с аналогом наблюдений $n' \geq (6 \div 10)$. Таких водпостов, действовавших в разные годы и действующих в настоящее

время, на территории Беларуси насчитывается более 50. Данные наблюдений с них содержатся в материалах Белгидромета.

К расчетам привлекается одна из соседних рек-аналогов (створов-аналогов), имеющая наиболее тесную прямолинейную корреляционную связь искомой величины с расчетным створом. Из нескольких потенциальных аналогов выбирается один, наиболее надежный.

Использование криволинейных связей или привлечение двух-трех аналогов для расчета уравнения множественной регрессии не оправдало себя. Поэтому выбору реки-аналога должен предшествовать графический анализ, который позволяет на первой стадии отсеять потенциальные, не привлекаемые к дальнейшим расчетам, реки (створы)-аналоги.

3.2.4. Расчеты стока при отсутствии данных наблюдений

При отсутствии данных гидрометрических наблюдений применяются методы расчетов статистических параметров стока, основанные на обобщении результатов наблюдений на изученных реках с использованием методов географической интерполяции, гидрологической аналогии, а также аналитических методов (с использованием расчетных формул).

Метод географической интерполяции основан на использовании специальных гидрологических карт. Основной картой для определения среднего многолетнего годового расхода стока является карта среднего многолетнего модуля годового стока, \bar{q} , л/(с · км²). Модуль стока представляет собой величину стока с единицы площади. Распределение этой величины по территории подчиняется закону географической зональности.

При построении карты модуля годового стока рек Беларуси (прил. 2) [7] использованы материалы наблюдений на реках с многолетними (репрезентативными) рядами наблюдений с площадью водосбора в основном от 100 до 5000 км². Это связано с тем, что реки с площадью водосбора менее 100 км², как правило, не полностью дренируют подземные воды вследствие неполного вреза русел относительно подземного горизонта. Некоторые же реки с площадью водосбора более 5000 км² могут протекать в нескольких географических зонах.

При составлении карты величины модуля стока относились к точке геометрического центра (центра тяжести) водосбора. Изолинии проведены путем линейной интерполяции между точками. Как видно из карты, модули среднегодового стока рек Беларуси изменяются от 7,5 л/(с · км²) — на севере до 3,0 л/(с · км²) — на юго-востоке. Высокие значения модуля годового стока рек на севере связаны в основном

с более высоким количеством атмосферных осадков и возвышенным (расчлененным) рельефом.

Средний многолетний годовой расход воды в расчетном створе при использовании карты определяется как

$$\bar{Q} = \bar{q}F \cdot 10^{-3}, \quad (3.19)$$

где \bar{Q} – средний многолетний годовой расход воды, м³/с; \bar{q} – средний многолетний годовой модуль стока, л/(с · км²); F – площадь водосбора, км².

Средний многолетний модуль стока по карте определяется для центра тяжести расчетного водосбора путем линейной интерполяции между изолиниями стока. В случае пересечения водосбора несколькими изолиниями вычисляется средневзвешенное значение модуля стока. Средний многолетний модуль стока также определяется интерполяцией между соседними (двумя, тремя или более) опорными реками-аналогами.

При определении нормы годового стока малых рек с площадью водосбора менее 100 км² вводятся поправочные коэффициенты на неполное дренирование подземных вод. Эти коэффициенты определяются по соседним рекам-аналогам, имеющим сходные условия (площадь водосбора, рельеф, гидрогеологическое строение, почвы, залесенность, заболоченность, озерность) или по формулам, разработанным для Беларуси [7, 8]. В параметры этих формул входят такие характеристики, как площадь водосбора, густота гидрографической сети, длина русла (основного тальвега), уклон русла. Для получения этих характеристик используются крупномасштабные топографические карты масштабов 1 : 10 000, 1 : 25 000, 1 : 50 000 и 1 : 100 000 (в зависимости от площади водосбора).

Для малых рек целесообразно проведение полевых изысканий (выявление выходов грунтовых вод, наличие карста, промерзания и пересыхания водотоков, особенностей формирования гидрологического режима, включая опрос местных жителей, и др.), организация совместных наблюдений с синхронным измерением расходов воды в расчетном створе и створе-аналоге.

Коэффициент вариации годового стока при отсутствии данных наблюдений определяется по карте (прил. 3), составленной с помощью тех же приемов, что и карта модуля среднегодового стока. Как видно, коэффициент вариации годового стока рек Беларуси изменяется от 0,15 на северо-западе до 0,55 на юго-востоке.

Для малых рек коэффициент вариации определяется по приближенной формуле [16] как

$$C_v = C_{v_a} \frac{\bar{q}_a}{\bar{q}}, \quad (3.20)$$

где \bar{q} и \bar{q}_a – средние многолетние модули годового расхода воды в расчетном створе и створе-аналоге (или снятого по карте), л/(с · км²).

Более точно коэффициент вариации малых рек Беларуси определяется с учетом поправочного коэффициента к величине, снятого по карте. Порядок расчетов поправочного коэффициента приведен в [7, 8].

Величина соотношения C_s / C_v принимается по рекам-аналогам или как среднее арифметическое из значений, установленных по данным соседних рек с учетом площадей водосборов и других азональных факторов [8].

Дальнейшие расчеты для определения величин стока заданной обеспеченности осуществляются аналогично изложенным выше приемам.

Пример 3.2

Рассчитать годовой расход воды обеспеченности 95 % р. Мужанки в устье. Река является левым притоком Березины. Площадь водосбора $F = 230$ км².

Расчеты производятся в следующем порядке.

1. По карте (см. прил. 2) определим модуль среднемноголетнего годового стока: $\bar{q} = 6,6$ л/(с · км²). Средний годовой расход воды, согласно формуле (3.19), составит

$$\bar{Q} = \bar{q}F \cdot 10^{-3} = 6,6 \cdot 230 \cdot 10^{-3} = 1,52 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2. По карте (см. прил. 3) определим коэффициент вариации $C_v = 0,20$.

3. Соотношение C_s / C_v согласно рекомендациям [8] примем равным 2,0.

4. По таблицам (см. прил. 1) определим ординату $k_{95\%} = 0,696$.

5. Рассчитаем годовой расход воды обеспеченности 95 % р. Мужанки:

$$Q_{95\%} = \bar{Q}k_{95\%} = 1,52 \cdot 0,696 = 1,06 \text{ м}^3/\text{с}.$$

В условиях разнообразия ландшафтов республики необходимо учитывать, что режим каждого из 20 тыс. водотоков, особенно малых, может существенно отличаться от режима стока крупных рек, где его формирование подчиняется закону географической зональности.

Для повышения точности гидрологических расчетов необходимо привлечение данных кратковременных наблюдений, охватывающих 1–5 лет или несколько гидрологических сезонов (таковые имеются в гидрометеофонде), а также проведение полевых инженерно-гидрологических изысканий, о чем подробно будет сказано в последующих разделах.

3.3. ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

3.3.1. Общие сведения о гидротехнических сооружениях и их классификация

Согласно Водному кодексу Республики Беларусь 2014 г. [13] *гидротехнические сооружения (ГТС)* – инженерные сооружения и устройства, предназначенные для добычи (изъятия), транспортировки, обработки вод, сброса сточных вод, регулирования водных потоков, нужд судоходства, охраны вод и предотвращения вредного воздействия вод (водозаборные сооружения, каналы, плотины, дамбы, шлюзы, гидроузлы, насосные станции, водоводы, коллекторы и иные подобные инженерные сооружения и устройства).

Наука, изучающая гидротехнические сооружения, устанавливающая методы их проектирования и разрабатывающая приемы их постройки и эксплуатации, называется *гидротехникой* [10]. Гидротехника изучает влияние водных потоков на ГТС и русла, разрабатывает теорию устойчивости ГТС, методы регулирования речного стока. Различают ГТС общие (используются в разных отраслях водного хозяйства) и специальные (в одной отрасли).

Общие ГТС:

- водоподпорные (плотины, дамбы);
- водопроводящие (каналы, трубопроводы и т. п.);
- регуляционные (дамбы, берегоукрепительные сооружения и т. п.).

Специальные ГТС:

- для выработки электроэнергии (здания ГЭС, турбины и т. п.);
- для водного транспорта (судоходные шлюзы, причалы, пирсы, доки и т. п.);
- рыбохозяйственные (рыбоводные пруды, рыбопропускные сооружения);
- для водоснабжения и канализации (водозаборы, насосные станции, водонапорные башни, очистные сооружения);
- гидромелиоративные (шлюзы-регуляторы, трубы-регуляторы и др.).

ГТС сооружаются на реках, каналах, озерах, водохранилищах и прудах, их подразделяют на *классы капитальности*. Класс сооружения зависит от народохозяйственного значения объекта и размера ущерба народному хозяйству в случае аварии или нарушения правил эксплуатации сооружений. Постоянные ГТС имеют *четыре класса* капитальности (I класс – самый высокий). Сроки службы основных ГТС в зависимости от класса [2]:

- для сооружений I и II классов – не менее 100 лет;
- для сооружений III и IV классов – не менее 50 лет.

От класса сооружения зависят принимаемые (назначаемые) расчетные обеспеченности гидрологических характеристик (годового стока, максимальных и минимальных расходов и уровней воды и др.). Чем выше класс капитальности сооружения, тем более экстремальные расчетные обеспеченности гидрологических характеристик назначаются при проектировании (эти характеристики необходимо рассчитать гидрологам).

Комплекс ГТС, объединенных общей народохозяйственной целью и территориально расположенных в одном месте, называют *гидроузлом*. В Беларуси их насчитывается более 150. Наиболее крупные: Вилейский Вилейско-Минской водной системы (ВМВС), Заславский, Осиповичский, Чигиринский, Краснослободский, а также головные сооружения судоходных каналов (рис. 3.3). В гидроузлы объединено большинство из построенных водохранилищ Беларуси.



Рис. 3.3. Днепровско-Бугский канал, гидроузел № 10 «Тришин», г. Брест

В перспективе гидротехническое строительство в Беларуси может развиваться по линии строительства гидроузлов комплексного использования – создания водохранилищ для регулирования стока при одновременном использовании их в целях энергетики, водообеспечения, водного транспорта, мелиорации и охраны вод.



Рис. 3.4. Гродненская ГЭС

Территория Беларуси равнинная, поэтому здесь могут быть использованы только низконапорные (напор менее 15 м) гидроэнергетические объекты. Крупнейшей в Беларуси является Гродненская ГЭС на р. Неман (мощность 17 МВт), построенная в 2012 г. (рис. 3.4), в стадии строительства – Полоцкая (22 МВт) и Витебская (40 МВт) на р. Западная Двина.

3.3.2. Классификация рек и каналов Беларуси

В Республике Беларусь насчитывается более 20 тыс. рек общей протяженностью более 90 тыс. км. Согласно Водному кодексу Республики Беларусь 2014 г. [13] реки республики подразделяются следующим образом:

- большие, протяженностью свыше 500 км – Березина, Горынь, Днепр, Западная Двина, Западный Буг, Неман, Припять, Сож;
- средние, протяженностью от 200 до 500 км – Беседь, Виляя, Друть, Западная Березина, Ипуть, Остер, Птичь, Свислочь, Уборть, Щара, Ясельда;
- малые, протяженностью от 5 до 200 км.

Водотоки протяженностью менее 5 км относятся к ручьям.

Канализированные реки – это реки или их участки, руслам которых придан вид каналов. Канализация рек в Беларуси осуществляется главным образом в мелиоративных целях, на крупных реках – для

улучшения судоходства. В Беларуси количество частично или полностью канализированных рек составляет более 1500, из них полностью (от истока до устья) — более 500. Общая протяженность канализированных рек и их участков — более 10 тыс. км.

Каналы — водопропускные сооружения, предназначенные для транспортирования воды и представляющие собой открытые искусственные русла правильных очертаний.

По пропускной способности различают большие, средние и малые каналы. По *назначению* каналы подразделяют следующим образом:

- судоходные — для обеспечения судоходства; крупнейшими в Беларуси являются Днепровско-Бугский (93 км, в составе Днепровско-Бугского водного пути общей протяженностью 196 км) и Августовский (общая протяженность — 103 км, в том числе на территории Беларуси — 22 км), Огинский (50,5 км, 2 участка);

- каналы комплексного назначения; крупнейший — канал Вилейско-Минской водной системы (62 км);

- осушительные — для осушения заболоченных и подтопленных территорий; преобладают в Беларуси (общее количество — более 2 тыс., общая протяженность — около 20 тыс. км);

- оросительные — для орошения земель на мелиоративных системах с двусторонним регулированием водного режима;

- обводнительные — для подачи воды в безводные и маловодные сельскохозяйственные районы;

- водопроводные для водоснабжения городов, поселков и промышленных предприятий;

- энергетические (деривационные) — для подвода воды к гидроэлектростанциям;

- лесосплавные;

- рыбоводные и др.

Количество сооружений на реках и каналах зависит от их гидрологического режима, класса капитальности и назначения ГТС или гидроузла.

Основными сооружениями на реках или каналах являются *водоподпорные плотины*, образующие *водохранилища* и *пруды*. К водохранилищам относятся искусственные водоемы и зарегулированные озера, полный объем которых составляет 1 млн м³ и более. В настоящее время на территории Беларуси насчитывается 153 водохранилища и около 1 тыс. прудов разного хозяйственного назначения (водоснабжение населения, промышленности, сельского хозяйства, рекреации и т. д.).

Из водохранилищ преобладают русловые, созданные на реках и каналах (52 %), на долю водоемов наливного типа приходится 35 %, озерного (зарегулированные озера) — 13 %.

3.3.3. Водоподпорные плотины. Проектные характеристики водохранилища

В Беларуси на реках и каналах сооружено около 1 тыс. плотин для создания водохранилищ и прудов различного назначения. Основные элементы водоподпорной плотины представлены на рис. 3.5, а проектные характеристики водохранилища – на рис. 3.6.

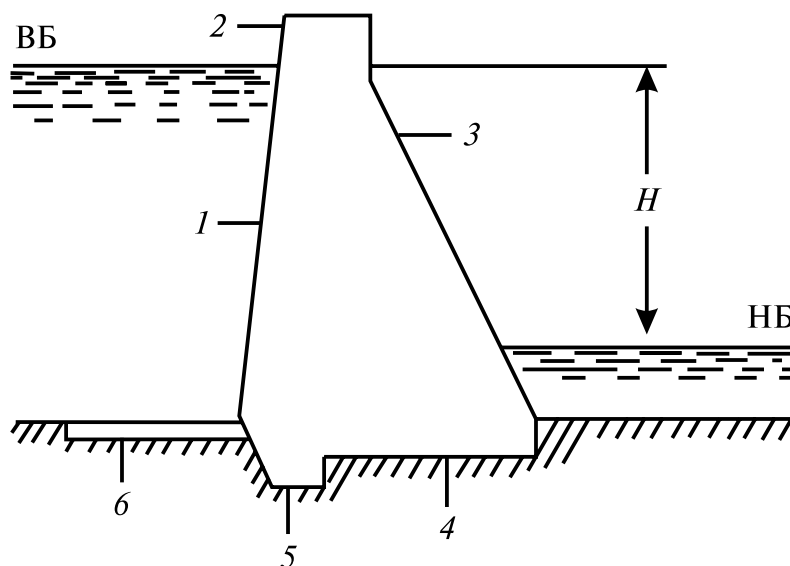


Рис. 3.5. Сооружение водоподпорной плотины:
1 – напорная грань; 2 – гребень; 3 – низовая грань; 4 – подошва;
5 – зуб (выступ); 6 – понур; ВБ, НБ – верхний и нижний бьефы

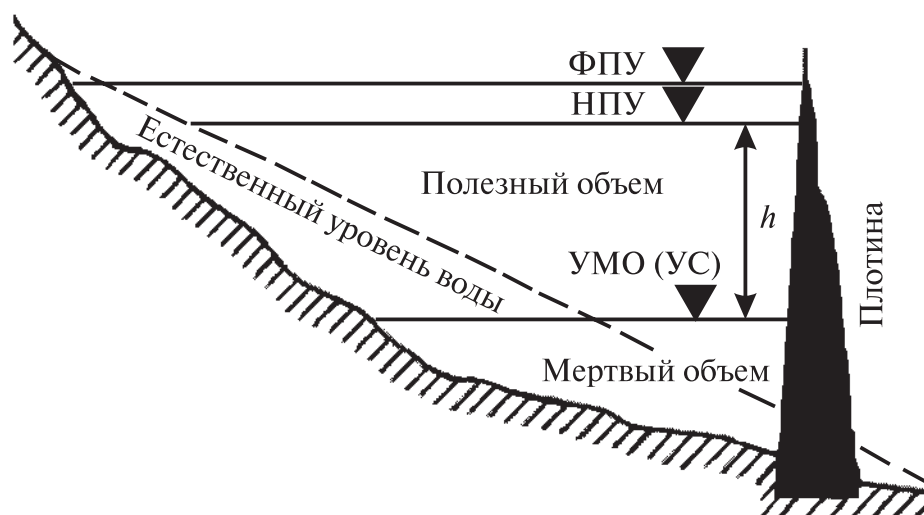


Рис. 3.6. Проектные характеристики водохранилища:
НПУ – нормальный подпорный уровень;
УМО (УС) – уровень мертвого объема (уровень сработки);
ФПУ – форсированный подпорный уровень

Дадим характеристику и определение этих элементов:

- бьеф — участок реки, расположенный относительно плотины выше по течению (верхний бьеф — ВБ) или ниже нее (нижний бьеф — НБ);
- нормальный подпорный уровень (НПУ) — проектный уровень водохранилища или пруда (верхнего бьефа), который можно поддерживать при нормальных условиях на протяжении довольно длительного времени; на этот уровень рассчитываются все количественные характеристики водоема;
- уровень мертвого объема (УМО) — наименьший уровень водоема, до которого возможна его сработка (УС); разность отметок НПУ и УМО характеризует высоту призмы сработки водохранилища h ;
- форсированный подпорный уровень (ФПУ) — максимальный уровень подъема в период половодья редкой повторяемости; на тот уровень при проектировании рассчитывается прочность плотины;
- полный объем — объем воды при НПУ;
- мертвый объем — объем воды при УМО;
- полезный объем — объем воды между НПУ и УМО, который можно использовать в хозяйственных целях;
- напор H — разность отметок воды при НПУ и уровне нижнего бьефа.

Почти все плотины в Беларуси — низконапорные (величина H не превышает 15 м), грунтовые, с ядром слабопроницаемого грунта, каменной отсыпкой (иногда — с отдельными железобетонными конструкциями).

3.3.4. Основные сооружения при земляной плотине

Рассмотрим основные сооружения при земляной плотине [5] (рис. 3.7, а–в).

Водоохранилища и пруды в большинстве случаев не вмещают весь речной сток. После наполнения выше НПУ (до ФПУ) излишек воды пропускается (сбрасывается) в нижний бьеф плотины в русло водотока.

Путь, по которому происходит сброс воды, называют *водосбросным трактом* (см. рис. 3.7, в). Он включает в себя подводящий канал, шлюз-регулятор (или неуправляемый водослив), сбросной канал, сопрягающее сооружение (быстроток) и отводящий канал.

Глубинный водосброс называется *водоспуском* (см. рис. 3.7, а, б). Он служит для полезных попусков воды из водохранилища в русло нижнего бьефа для полного освобождения водохранилища от воды (при очистке от отложившихся наносов и мусора, ремонте плотины, по условиям выращивания рыбы). Он не обязателен и не всегда имеется.

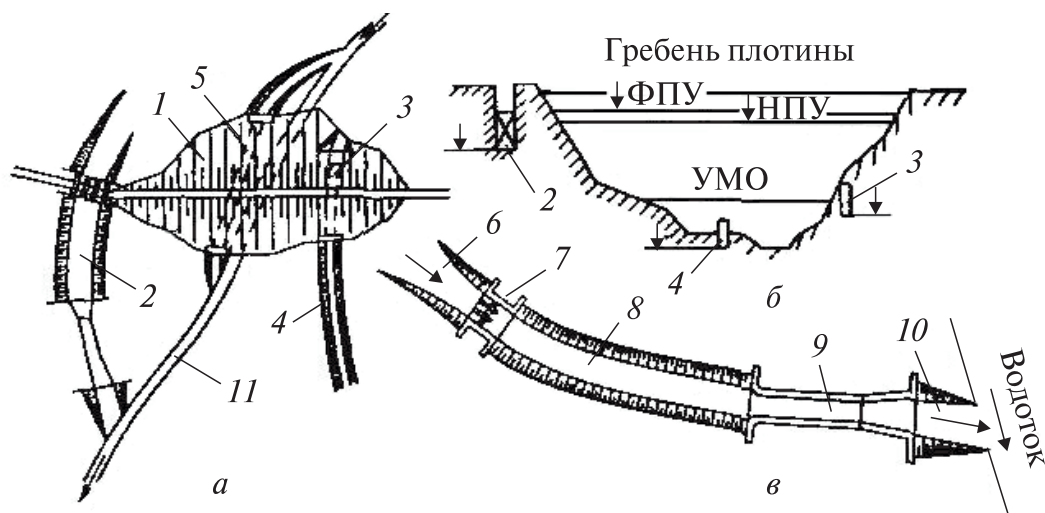


Рис. 3.7. Сооружения при земляной плотине (по М. В. Нестерову, 2006):

- а – план земляной плотины, б – продольный разрез по оси плотины,
 в – план водосбросного тракта; 1 – плотина, 2 – водосбросной тракт,
 3 – водозаборное сооружение (водозабор), 4 – магистральный канал,
 5 – водоспуск, 6 – подводящий канал, 7 – шлюз-регулятор,
 8 – сбросной канал, 9 – сопрягающее сооружение,
 10 – отводящий канал, 11 – русло водотока

Поверхностный водосброс через бетонную плотину называется *водосливом*. Он может быть регулируемым (с одним или несколькими затворами) и нерегулируемым (водосливная плотина).

Водозаборное сооружение (водозабор) – сооружение, при помощи которого вода забирается из водохранилища, подается машинным способом или самотеком в *магистральный канал* и дальше транспортируется к потребителю.

Из других специальных сооружений следует отметить:

- *водопроводящие сооружения*: акведук (безнапорный участок водовода при пересечении малых рек, каналов понижений местности, часто в виде моста над рекой, дорогой, ложбиной и т. д.) и дюкер (напорный участок водовода под рекой, каналом, дорогой и т. д. – например, вдоль трассы Вилейско-Минской водной системы);

- *водорегулирующие сооружения* (шлюзы-регуляторы, трубы-регуляторы) на мелиоративных системах для регулирования уровней и расходов воды в каналах;

- *судопроечные* (включая шлюзы), *лесопропусчные*, *рыбопропусчные* сооружения, *трубопроводы*, *коллекторы*, *лотки*, *туннели*, *дамбы* и др.

Состав и компоновка гидроузла зависят от назначения объекта, гидрологического режима, величины напора в створе плотины, топографических и геологических условий, а также эксплуатационных требований.

3.3.5. Порядок перекрытия русла реки при строительстве гидроузла

Один из наиболее распространенных вариантов перекрытия русел рек при строительстве гидроузлов в Беларуси рассмотрим на примере Полоцкой ГЭС (мощность 22 МВт) на р. Западная Двина (рис. 3.8). Строительство гидроузла осуществляется в настоящее время.

На начальной стадии на левом берегу был прорыт обводной канал, чтобы отвести воду в реку для строительства земляной плотины (ширина канала по дну 70 м, максимальная глубина 20 м, длина 950 м). В первую очередь разрабатывалась центральная часть канала, затем концевые участки и их крепление. Грунтовый массив между будущим котлованом и правым откосом канала остался нетронутым и служит в качестве продольной перемычки.

Далее отсыпались временные ограждающие поперечные земляные перемычки (пионерным способом, т. е. начиная от берегов), предотвращающие поступление воды из реки в котлован со стороны нижнего и верхнего бьефов.



Рис. 3.8. Здание Полоцкой ГЭС и подводящий канал (вид с верхнего бьефа)

После замыкания котлована перемычками производилась откачка воды из него и далее весь комплекс работ по строительству земляной плотины, возведению всех сооружений гидроузла и установке технологического оборудования.

Основным элементом гидроузла является земляная плотина (см. рис. 3.7, *а, б*), которую строят на суженном месте поймы (в условиях Беларуси – высотой до 15 м) из однородных грунтов и с антифильтрационным ядром (из глины и суглинка).

Далее производится разборка низовой и верховой ограждающих перемычек с последующей ликвидацией обводного канала. Один из возможных вариантов – канал может быть преобразован в водосбросной тракт (см. рис. 3.7, *а, б*).

Согласно Кодексу Республики Беларусь о земле [15] и в соответствии с архитектурным проектом Полоцкой ГЭС предусматривался и был выполнен предварительный отвод земель под гидроузел.

При перекрытии реки проводились необходимые гидрологические работы (наблюдения за уровнями и расходами воды в заранее намеченных и оборудованных гидростворах). По завершении работ будет проведена рекультивация и благоустройство территории.

Первый агрегат Полоцкой ГЭС пущен в эксплуатацию 20 февраля 2017 г.

3.3.6. Стадии проектирования и строительства ГТС. Методы проектирования

Строительство и использование ГТС состоит из 4 этапов.

1. Изыскания (изучение геологического строения, рельефа, климата и гидрологического режима, хозяйственной деятельности в районе строительства). Вопросы гидрологических изысканий подробно рассматриваются в разделе 3.4.

2. Проектирование (определение на основании данных изысканий и водохозяйственных задач основных конструкций и параметров ГТС, выбор методов строительства).

3. Организация и проведение строительных работ в соответствии с проектом сооружений.

4. Эксплуатация (руководство использованием, надзор за состоянием, текущий и капитальный ремонт).

Проектирование и строительство ГТС осуществляются согласно техническому кодексу проектирования [2].

Ниже приведены сведения о стадиях проектирования ГТС, которые необходимо знать инженеру-гидрологу.

Первой проектной стадией является обоснование инвестиций в строительство объектов. На этой стадии рассматривается ряд альтернативных вариантов, выполняются расчеты по определению эффективности инвестиций, социальных, экологических и других последствий строительства и эксплуатации объекта.

Второй проектной стадией является разработка проекта ГТС, который включает в себя архитектурный и строительный проекты. В *архитектурном проекте* устанавливаются водохозяйственный режим, типы и основные детали сооружений, организация строительства. Архитектурный проект подлежит государственной экспертизе в установленном порядке. На его основе открывается финансирование и начинаются строительные работы. *Строительный проект* разрабатывается на основе архитектурного проекта и обеспечивает непосредственную реализацию инвестиций в строительство объекта. На этой стадии проектная организация разрабатывает рабочую документацию, детальные чертежи сооружений и их элементов.

Для сооружений менее значимых и технически несложных, строящихся по типовым проектам, предусматривается одностадийное проектирование, при котором в состав проектной документации входит строительный проект, где выделяется и отдельно утверждается архитектурная часть.

По завершении любой стадии проектирования осуществляется *оценка проектных проработок*. Их рассматривают, рецензируют и утверждают соответствующие уровню проекта органы. Если проект затрагивает интересы нескольких отраслей народного хозяйства, то в установленном директивными органами порядке он согласовывается с соответствующими территориальными или центральными ведомствами.

При составлении проектов специалисты руководствуются инструкциями по разработке проектов и смет для строительства мелиоративных объектов, техническими условиями, типовыми проектами, каталогами, стандартами и другими нормативными документами.

Методы проектирования ГТС. Метод теоретических исследований является основным. Он устанавливает зависимости и закономерности, которые позволяют рассчитывать ГТС, т. е. определять их форму и размеры, не прибегая к эксперименту, созданию моделей и т. п.

Экспериментальный лабораторный метод, при котором на основании лабораторного моделирования сооружений и конструкций проверяются

те или иные положения теории, что позволяет находить правильные проектные решения.

Экспериментальный натурный метод, при котором опыты и наблюдения проводятся на строящихся, построенных и эксплуатируемых ГТС или на специальных опытных сооружениях, выполненных в натуральную величину.

Метод вариантного проектирования заключается в рассмотрении ряда вариантных решений задачи и их технико-экономическом сопоставлении, что позволяет найти наиболее целесообразное в техническом и экономическом отношении решение.

Статистический метод применяется для обобщения данных о многократно использовавшихся типах конструкций и получения статистических зависимостей, которые могут быть использованы в дальнейшем. Используя этот метод, необходимо учитывать тенденции дальнейшего развития теории и практики в данной области.

Метод аналогии и повторения решений – наиболее примитивный, но при правильном применении надежный. Он заключается в использовании решений или конструкций, уже применявшихся на практике в сходных условиях. С помощью метода аналогий разрабатываются типовые решения.

Управление водными ресурсами и их использование в тех или иных целях осуществляется посредством ГТС и гидроузлов, эффективность и надежность работы которых зависят во многом от качества разработки проектов и в первую очередь инженерно-гидрологических исследований и надежности расчетов.

3.4. ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.4.1. Классификация водных исследований

Целью экспедиционных инженерно-гидрологических исследований является получение данных для всесторонней характеристики водного объекта в виде вероятностных характеристик гидрологического режима (уровень, расход воды и др.) в створе проектирования ГТС [12].

Комплексные исследования и изыскания проводятся с учетом потребностей всех заинтересованных в использовании водного объекта отраслей народного хозяйства.

Изыскания некомплексного характера проводятся для какой-либо одной отрасли, например:

- гидротехнического строительства;
- водоснабжения населенных пунктов, промышленных предприятий;
- водных мелиораций;
- водного транспорта;
- рыбного хозяйства;
- защиты от вредного воздействия вод;
- железных и шоссейных дорог;
- трубопроводов (водных, газо- и нефтепроводов);
- переходов через реки линий электропередачи и др.

В последнее время изыскания проводятся, как правило, комплексно.

По характеру водного объекта различают гидрологические исследования на реках, каналах, озерах, водохранилищах (прудах), болотах, мелиоративных системах.

Различают также гидрологические исследования до постройки ГТС (гидроузла), в процессе его строительства и после – в период эксплуатации.

3.4.2. Этапы и состав работ

Все исследования и изыскания на водных объектах проводятся в определенной последовательности. Различают три этапа: 1) подготовительные работы; 2) полевые работы; 3) окончательные камеральные работы.

Подготовительные работы включают в себя организационные и предварительные камеральные работы. В организационные работы входят: определение объема исследований и изысканий, составление программы и календарного плана, сметы. Предварительные камеральные работы заключаются в сборе, систематизации, изучении и анализе уже имеющихся материалов по гидрологической изученности объекта исследований (гидрологические ежегодники, материалы гидрометеофонда, топокарты, литературные источники, отчеты прошлых лет). Это позволяет более обоснованно составить программу экспедиционных гидрологических работ, определяемых поставленной задачей и наличием исходных данных, и максимально сократить объем этих работ.

Полевые работы выполняются непосредственно на местности (водном объекте). Состав и объем их различны для каждого объекта.

Камеральные работы являются завершающим этапом изысканий и исследований. Они включают в себя обработку всех материалов, их оформление, составление отчета.

Каждой стадии проектирования ГТС соответствует определенная стадия гидрологических изысканий, призванная обеспечить проектировщиков всеми необходимыми материалами.

Для разработки сложных и ответственных гидроузлов самым начальным шагом является составление технико-экономического обоснования (ТЭО). При использовании всего бассейна реки этот вид разработки называется составлением СКИОВР. Ее основная задача — определение использования водных ресурсов с учетом перспективы развития прилегающего экономического района. При этом проводится выбор и обоснование первоочередных объектов гидротехнического строительства.

В задачи составления ТЭО входит изучение имеющихся материалов по бассейну реки для всестороннего освещения природных и экономических условий, а также рекогносцировочные обследования на местности для получения необходимых сведений, которые не могли быть почерпнуты из литературных и архивных источников. На основании ТЭО производится проектирование ГТС (см. п. 3.3.6).

Осуществление изысканий и проектирования должно вестись при строгом соблюдении Водного кодекса Республики Беларусь 2014 г. [13]. Изыскания должны обеспечить возможность прогнозировать изменения гидрологических условий в результате работы ГТС и осуществлять необходимые водоохранные мероприятия.

В результате гидрологических исследований и изысканий должны быть получены следующие материалы:

- данные для выбора створа гидроузла (перехода);
- данные для определения отметок НПУ (при проектировании гидроузла), бровок мостов, дамб и т. д.;
- гидрологические данные о расходах воды для определения расчетных расходов турбин и расчета водосбросных сооружений;
- другие сведения о гидрологическом режиме, состав которых определяется спецификой проектируемого ГТС.

3.4.3. Гидрологические работы в составе экспедиционных исследований

Инженерно-гидрологические работы включают широкий круг исследований, связанных с изучением гидрологического режима.

Состав и объем гидрологических работ определяются:

- целью, для которой проводятся изыскания;
- физико-географическими условиями водосбора;

- степенью изученности водного объекта;
- гидрологическим режимом водного объекта;
- размером и конструкцией проектируемой ГТС.

Гидрологические работы имеют свою особенность: они связаны с годовым циклом водного режима и по возможности должны охватывать все сезоны (весеннее половодье, летне-осенняя межень, дождевые и зимние паводки).

В состав инженерно-гидрологических работ входят следующие.

Топогеодезические работы включают составление плана долины реки на исследуемом участке (масштаб съемки определяется размерами реки, участка исследований и проектируемого ГТС). Чем выше класс сооружений, тем крупнее масштаб и больше размер участка. При необходимости выполняются крупномасштабные топосъемки (1 : 10000 – 1 : 500), используются материалы аэрокосмической съемки.

Производится нивелирование намеченных поперечных и продольных профилей реки, временных свай, контрольных реперов, абсолютные отметки которых привязываются к Государственной геодезической сети.

Промерные работы включают измерение глубин по намеченным поперечным профилям. Они сопровождаются регистрацией уровней воды, визуальным определением грунтов дна. Промерные работы стремятся провести при низких уровнях воды в период летне-осенней межени. По данным промеров составляются поперечные и продольные профили, а также план участка реки с показанием рельефа дна в горизонталях или изобатах. При проведении промеров на каждом поперечнике определяют абсолютную отметку уреза воды.

Наблюдения за уровнем и уклоном водной поверхности, измерения расходов воды проводятся согласно наставлениям гидрометеослужбы. Они относятся к основным видам наблюдений. При необходимости организуют временные гидрологические посты.

Согласно наставлениям измерения уровней воды ведутся ежедневно (в 8 и 20 ч). Измерения же расходов воды, как и на гидрологических постах, делают с расчетом, чтобы результаты измерений позволили осветить всю амплитуду колебаний уровня. Это необходимо для построения кривой расходов и последующего вычисления ежедневных расходов воды по уровням.

При установлении частоты и сроков измерений расходов придерживаются следующих рекомендаций. В весеннее половодье выполняют 4–5 измерений расхода на подъеме и 5–8 – на спаде. В устойчивую

межень делают одно измерение через 7–10 дней; при прохождении дождевых паводков — 1–2 измерения на подъеме и 2–3 — на спаде; при устойчивом ледоставе — через 10–20 дней; при ледоходе и шугоходе — так часто, как это возможно.

Основной способ измерения расходов воды — гидрометрической вертушкой, вспомогательный — поверхностными поплавками. Последний способ (менее точный) применяют при невозможности использовать основной: в периоды ледохода и шугохода, при малых скоростях течения (менее 0,04 м/с), а также в период рекогносцировочного обследования. Погрешность измерения скорости воды вертушкой составляет 2–5 %, поверхностными поплавками — 5–10 %.

Для измерения расходов воды при прохождении половодья и паводка часто бывает проблематично измерить расход воды по естественным условиям и техническим причинам. К тому же в период обследований зачастую не всегда удается проследить пик половодья паводка, а при проектировании важно располагать расчетными экстремальными значениями максимальных уровней и расходов воды. В таких случаях применяется морфометрический способ определения расхода воды, суть которого заключается в следующем.

В створе проектирования разбивают так называемый «морфоствор» и по нему делают нивелировку поперек всей долины реки, вплоть до максимальных исторических отметок высоких вод. По результатам нивелировки строится поперечный профиль долины, позволяющий определить площадь поперечного сечения при расчетном уровне высоких вод. Умножая величину площади поперечного сечения на среднюю скорость течения, получают расход воды:

$$Q = \omega v_{\text{cp}}.$$

Для определения средней скорости течения применяют известную формулу Шези (2.17):

$$v_{\text{cp}} = C\sqrt{Ri} \approx C\sqrt{h_{\text{cp}}i},$$

где v_{cp} — средняя скорость течения, м/с; R — гидравлический радиус, м; h_{cp} — средняя глубина потока, м; i — относительный продольный уклон, м/м; C — коэффициент Шези, м^{0,5}/с².

Коэффициент C определяется по формулам Павловского или по табл. 2.4 — в зависимости от R (или h_{cp}) и коэффициента шероховатости n (см. п. 2.4.1).

Величина коэффициента шероховатости различных частей живого сечения может быть неодинаковой, поэтому площадь поперечного

сечения расчленяют на отсеки: русло, низкая пойма, высокая пойма и т. д. Затем вычисляют отдельно расход каждого отсека и путем суммирования получают общий расход.

Величину уклона водной поверхности получают по уклонному посту, который устраивается на весь период проведения экспедиционных работ, или путем нивелирования. В последнем случае на местности находят метки высоких вод, закрепляют их кольями, нивелируют и определяют падение. Разделив падение на расстояние, получают уклон.

Для определения уровня исторических паводков и половодий изучают их следы на местности: по отложениям наносов на берегах реки и склонах долины, по задержанному плавнику (водоросли, хворост, мох и т. п. на кустах и деревьях), по меткам высоких вод на мостах, постройках и т. п., а также по результатам опросов местных жителей-старожилов.

Морфометрический способ также применяют в гидрометеослужбе при экстраполяции кривых расходов воды $Q = f(H)$.

Кроме рассмотренных видов гидрологических работ проводятся специальные изыскания по отдельным программам в зависимости от индивидуальных особенностей гидрологического режима водного объекта и конструкций ГТС (измерение скоростей и направлений течений, расходов взвешенных наносов, изучение температурного и ледового режима, русловых процессов и др.).

Все собранные материалы систематизируют, анализируют и на этой основе составляют подробную гидрологическую характеристику реки в виде гидрологической записки, где приводят вероятностные характеристики уровней, расходов воды и т. п. со всеми необходимыми расчетами.

3.5. НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ КОДЕКСЫ

Систематические гидрологические наблюдения в Беларуси проводятся около 150 лет и в настоящее время осуществляются на 109 постах (99 постов — на водотоках и 10 — на водоемах). В свое время еще на почти 150 закрытых по разным причинам постах проводились регулярные наблюдения. Эти данные следует включать в обработку при гидрологических обобщениях и максимально использовать при проведении инженерно-гидрологических изысканий.

Координацию всех гидрологических наблюдений и обобщений осуществляет «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» (название с 01.01.2015). Региональное руководство и контроль осуществляют пять отделов гидрологии облгидрометов (Брест, Гомель, Гродно, Витебск и Могилев), две гидрологические станции (Минск и Полоцк), а также два межрайонных центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Мозырь и Пинск).

По мере накопления материалов наблюдений методы гидрологических расчетов уточнялись и совершенствовались. На протяжении десятилетий периодически обобщались и переиздавались материалы, содержащие обновленные и уточненные данные, касающиеся различных гидрологических характеристик. Основными источниками гидрологической информации являются данные *Государственного водного кадастра* (ГВК). Согласно Водному кодексу Республики Беларусь 2014 г. [13] ГВК представляет собой систематизированный свод данных:

- о водных объектах (их количестве, местоположении, площади или протяженности с учетом классификации водных объектов);
- гидробиологических, гидрохимических и гидроморфологических показателях поверхностных водных объектов, их экологическом состоянии (статусе);
- водопользователях, осуществляющих использование вод на правах специального, обособленного водопользования поверхностными водными объектами (их частями) для хозяйственно-питьевых, гидроэнергетических нужд и нужд обеспечения обороны, а также праве аренды для рыбоводства (по видам и целям водопользования);
- об объемах добываемой (изымаемой) воды, сбрасываемых сточных вод;
- о запасах подземных вод;
- об учете добываемых подземных вод, изымаемых поверхностных вод и сточных вод, сбрасываемых в окружающую среду;
- другие сведения об использовании и охране вод.

Ведение государственного водного кадастра осуществляется Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь совместно с Министерством здравоохранения Республики Беларусь. Порядок ведения государственного водного кадастра и использования его данных устанавливается Советом Министров Республики Беларусь. Материалы ГВК издаются в виде справочников и монографий.

К числу основных документов ГВК, используемых при инженерно-гидрологических исследованиях и расчетах, в Беларуси относятся следующие издания:

- а) справочники по ресурсам поверхностных вод [18–20];
- б) гидрологические ежегодники, издававшиеся по 1979 г.;
- в) ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши, начиная с 1980 г.

Проведение инженерно-гидрологических расчетов и исследований должно основываться на данных систематических многолетних наблюдений, в том числе данных последних лет, опубликованных в специальных документах Белгидромета. Помимо этих материалов должны использоваться данные инженерно-гидрологических изысканий других ведомств и результаты специальных наблюдений и исследований. При отсутствии наблюдений для объекта проектирования необходимо проводить инженерно-гидрологические изыскания в соответствии с П1 к СНБ 1.02.01, а также с действующими нормативными документами.

Нормативные документы Республики Беларусь регламентируют проведение инженерно-гидрологических исследований и расчетов при водохозяйственном проектировании и строительстве на территории республики. Методы гидрологических расчетов в настоящем учебно-методическом пособии изложены на основе последних рекомендаций и указаний, содержащихся в республиканских нормативных документах. С 1 июля 2010 г. в Республике Беларусь введен в действие технический кодекс установившейся практики (ТКП) по гидрологическим расчетам [8].

Важно отметить, что технический кодекс установившейся практики проектирования (далее – технический кодекс) разработан на основе действующих нормативных правовых актов Республики Беларусь в области охраны и использования водных ресурсов, учитывает положения Водного кодекса Республики Беларусь (2014), Кодекса Республики Беларусь о земле (2008) и гармонизирован с положениями межгосударственного свода правил (МСП) по проектированию и строительству: «Определение основных расчетных гидрологических характеристик. МСП 3.04-101-2005» (взамен СНиП 2.01.14-83).

В техническом кодексе использованы ссылки на республиканский нормативный документ [7] «Пособие П1-98 к СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик».

Это издание имеет статус технического нормативного правового акта на переходный период до его замены техническими нормативными

правовыми актами, предусмотренными Законом Республики Беларусь «О техническом нормировании и стандартизации».

Технический кодекс устанавливает порядок определения расчетных гидрологических характеристик при проектировании: речных гидротехнических сооружений, железных и автомобильных дорог, сооружений мелиоративных систем, систем водоснабжения, планировки и застройки населенных пунктов, генеральных планов промышленных и сельскохозяйственных предприятий, а также порядок разработки природоохранных, противопаводковых мероприятий и схем комплексного использования и охраны водных ресурсов на территории Республики Беларусь.

Гидротехнические сооружения следует проектировать исходя из требований комплексного использования водных и земельных ресурсов бассейнов рек, с учетом данных и положений, содержащихся в Водном кодексе Республики Беларусь 2014 г. [13] и Кодексе Республики Беларусь о земле [15], схемах комплексного использования водных и земельных ресурсов бассейнов рек и других материалах, обязательных для использования.

Проектирование и строительство ГТС осуществляются согласно техническому кодексу «Гидротехнические сооружения. Строительные нормы проектирования. ТКП 45-3.04-169-2009 (02250)» (взамен СНиП 2.06.01-86 «Гидротехнические сооружения. Основные положения по проектированию и изменение № 1 к нему») [2].

При разработке проектов ГТС следует руководствоваться действующим законодательством в области охраны окружающей среды и ТНПА, устанавливающим требования к охране природной среды при инженерной деятельности. К землям водного фонда относятся земли, занятые водными объектами, а также земельные участки, предоставленные для ведения водного хозяйства, в том числе для размещения ГТС, водохозяйственных сооружений и устройств. Мероприятия по охране окружающей среды следует разрабатывать в комплексе с прогнозом ее изменения в связи с созданием ГТС.

В целях разработки рекомендаций по охране и рациональному (устойчивому) использованию водных ресурсов в соответствии с Водным кодексом Республики Беларусь 2014 г. [13] для бассейнов крупных рек – Днепр, Западная Двина, Западный Буг, Неман и Припять – создаются *бассейновые советы*.

Бассейновый совет – межведомственный и межтерриториальный консультативный орган. Решения советов являются рекомендательными; они направляются в соответствующие местные исполнительные

и распорядительные органы, а также в Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Решения бассейновых советов учитываются при разработке планов управления речными бассейнами и при разработке программ в области охраны и использования вод в границах речных бассейнов.

Состав бассейновых советов включает представителей государственных органов, водопользователей, а также общественных объединений и научных организаций и утверждается Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Порядок деятельности бассейновых советов определяется Советом Министров Республики Беларусь.

Гидрологи играют значительную роль в обслуживании водного хозяйства и гидротехнического строительства в республике. Без гидрометеорологической информации, данных инженерно-гидрологических расчетов и изысканий не обходится ни одно направление использования вод. Гидрологи обеспечивают проектирование ГТС исходной информацией, состав и объем которой тесно связаны с видом сооружения. Они являются участниками эксплуатации различных водохозяйственных систем и расположенных на них ГТС.

Для успешной разработки проектов ГТС и гидроузлов будущий гидролог должен:

- обладать теоретическими и практическими знаниями в области гидравлики и инженерной гидрологии;
- знать содержание ГVK и источники гидрологической информации;
- владеть методами гидрологических расчетов в целях проектирования ГТС;
- уметь обрабатывать и систематизировать материалы гидрометеорологических наблюдений и изысканий, делать выводы и обобщения;
- знать основные конструкции ГТС, прогнозировать последствия, вызванные их строительством и эксплуатацией;
- знать действующие нормативные документы по проектированию ГТС, а также требования, предъявляемые практикой и нормами проектирования к составу инженерно-гидрологических исследований;
- знать гидрологические проблемы комплексного использования и охраны водных ресурсов Республики Беларусь;
- уметь самостоятельно работать с нормативной и справочной литературой;
- уметь применять полученные знания в проведении инженерно-гидрологических расчетов и изысканий в Республике Беларусь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Волчек, А. А.* Гидрологические и водохозяйственные расчеты : учеб.-метод. пособие / А. А. Волчек. – Горки : БГСХА, 2015. – 294 с.
2. Гидротехнические сооружения. Строительные нормы проектирования. ТКП 45-3.04-169-2009 (02250). – Минск : М-во стр-ва и архитектуры Респ. Беларусь, 2010. – 47 с.
3. *Жарский, М. А.* Гидравлика, гидрология и метеорология : пособие / М. А. Жарский, Г. Н. Рудковская. – Горки : БГСХА, 2013. – 292 с.
4. *Караушев, А. В.* Речная гидравлика / А. В. Караушев. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – 416 с.
5. *Нестеров, М. В.* Гидротехнические сооружения / М. В. Нестеров. – Минск : Новое знание, 2006. – 616 с.
6. *Орлов, В. Г.* Основы инженерной гидрологии / В. Г. Орлов, А. В. Сикан. – СПб. : РГГМУ, 2003. – 187 с.
7. Пособие П1-98 к СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. Издание официальное. – Минск : М-во стр-ва и архитектуры Респ. Беларусь, 2000. – 174 с.
8. Расчетные гидрологические характеристики. Порядок определения. ТКП 45-3.04-168-2009 (02250). – Минск : М-во стр-ва и архитектуры Респ. Беларусь, 2010. – 55 с.
9. *Спицын, И. П.* Общая и речная гидравлика / И. П. Спицын, В. А. Соколова. – Л. : Гидрометеиздат, 1990. – 355 с.
10. *Субботин, А. С.* Основы гидротехники / А. С. Субботин. – Л. : Гидрометеиздат, 1983. – 318 с.
11. *Чугаев, Р. Р.* Гидравлика : учеб. для вузов / Р. Р. Чугаев. – 4-е изд. – Л. : Энергоиздат, 1982. – 672 с.
12. *Шмидт, А. В.* Водно-технические изыскания / А. В. Шмидт. – 3-е изд. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 357 с.
13. Водный кодекс Республики Беларусь [Электронный ресурс] : 30 апр. 2014 г., № 149-3 : принят Палатой представителей 2 апр. 2014 г. : одобрен Советом Респ. 11 апр. 2014 г. // Эталон. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2014.
14. *Волчек, А. А.* Гидрометрическая практика: пособие / А. А. Волчек, В. К. Курсаков, Ан. А. Волчек. – Горки : БГСХА, 2011. – 242 с.
15. Кодекс Республики Беларусь о земле [Электронный ресурс] : 23 июля 2008 г., № 425-3 : принят Палатой представителей 17 июня 2008 г. : одобрен Советом Респ. 28 июня 2008 г. : в ред. Закона Респ. Беларусь от 04.01.2014 // Эталон. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2014.
16. *Лучшева, А. А.* Практическая гидрология / А. А. Лучшева. – Л. : Гидрометеиздат, 1976. – 440 с.
17. *Плужников, В. Н.* Оценка и прогноз ресурсов поверхностных вод и их изменений под влиянием хозяйственной деятельности / В. Н. Плужников, А. А. Макаревич, Е. Е. Петлицкий. – Минск : М-во природы Респ. Беларусь, 1995. – 93 с.

18. Ресурсы поверхностных вод СССР : в 20 т. Т. 5 : Белоруссия и Верхнее Поднепровье. Ч. I. — Л. : Гидрометеиздат, 1966. — 718 с.
19. Ресурсы поверхностных вод СССР. В 20 т. Т. 5 : Белоруссия и Верхнее Поднепровье. Ч. II. — Л. : Гидрометеиздат, 1966. — 620 с.
20. Ресурсы поверхностных вод СССР : в 20 т. Т. 5 : Белоруссия и Верхнее Поднепровье. Описание рек и озер : в 2 ч. — Л. : Гидрометеиздат, 1971. — Ч. 1. — 1108 с. Ч. 2. — 336 с.
21. Справочник по гидравлическим расчетам / под ред. Г. П. Киселева. — 4-е изд. — М. : Энергия, 1972. — 312 с.
22. *Чеботарев, А. И.* Гидрологический словарь / А. И. Чеботарев. — 3-е изд. — Л. : Гидрометеиздат, 1978. — 308 с.

Приложение 1

Ординаты k_p трехпараметрического гамма-распределения

$P, \%$	Коэффициент вариации C_v									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$C_s = 0,5C_v$										
0,01	1,38	1,76	2,13	2,47	2,74	2,91	2,89	—	—	—
0,1	1,31	1,63	1,95	2,25	2,50	2,69	2,74	—	—	—
1	1,24	1,48	1,72	1,95	2,17	2,37	2,50	—	—	—
5	1,17	1,33	1,51	1,68	1,86	2,03	2,22	—	—	—
10	1,13	1,26	1,39	1,53	1,67	1,83	2,01	—	—	—
25	1,07	1,13	1,20	1,27	1,35	1,45	1,56	—	—	—
50	0,999	0,997	0,993	0,988	0,980	0,962	0,920	—	—	—
75	0,932	0,862	0,789	0,709	0,615	0,503	0,376	—	—	—
95	0,837	0,676	0,517	0,362	0,221	0,113	0,047	—	—	—
99	0,772	0,554	0,354	0,189	0,080	0,025	0,006	—	—	—
99,9	0,700	0,428	0,210	0,076	0,019	0,003	0	—	—	—
$C_s = C_v$										
0,01	1,38	1,81	2,26	2,70	3,15	3,57	3,95	4,31	4,64	4,92
0,1	1,32	1,67	2,03	2,4	2,77	3,13	3,48	3,82	4,13	4,42
1	1,24	1,49	1,76	2,03	2,3	2,59	2,88	3,16	3,46	3,75
5	1,17	1,34	1,52	1,70	1,90	2,10	2,30	2,53	2,76	3,02
10	1,13	1,26	1,40	1,54	1,68	1,83	1,99	2,16	2,35	2,55
25	1,07	1,13	1,20	1,26	1,33	1,39	1,46	1,52	1,59	1,64
50	0,998	0,993	0,985	0,972	0,954	0,928	0,891	0,836	0,76	0,665
75	0,932	0,861	0,787	0,708	0,622	0,528	0,426	0,321	0,224	0,144
95	0,838	0,683	0,533	0,392	0,263	0,157	0,081	0,036	0,013	0,004
99	0,775	0,568	0,383	0,229	0,115	0,047	0,015	0,004	0,001	$1,0 \times 10^{-4}$
99,9	0,707	0,451	0,247	0,108	0,036	0,008	0,001	$2,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-5}$	$2,0 \times 10^{-6}$
$C_s = 1,5C_v$										
0,01	1,40	1,86	2,38	2,94	3,55	4,19	4,88	5,61	6,38	7,19
0,1	1,33	1,70	2,11	2,54	3,02	3,52	4,06	4,62	5,22	5,84
1	1,24	1,51	1,79	2,09	2,42	2,76	3,11	3,49	3,89	4,30
5	1,17	1,35	1,53	1,72	1,92	2,13	2,34	2,57	2,80	3,03
10	1,13	1,26	1,40	1,54	1,68	1,82	1,97	2,11	2,26	2,41

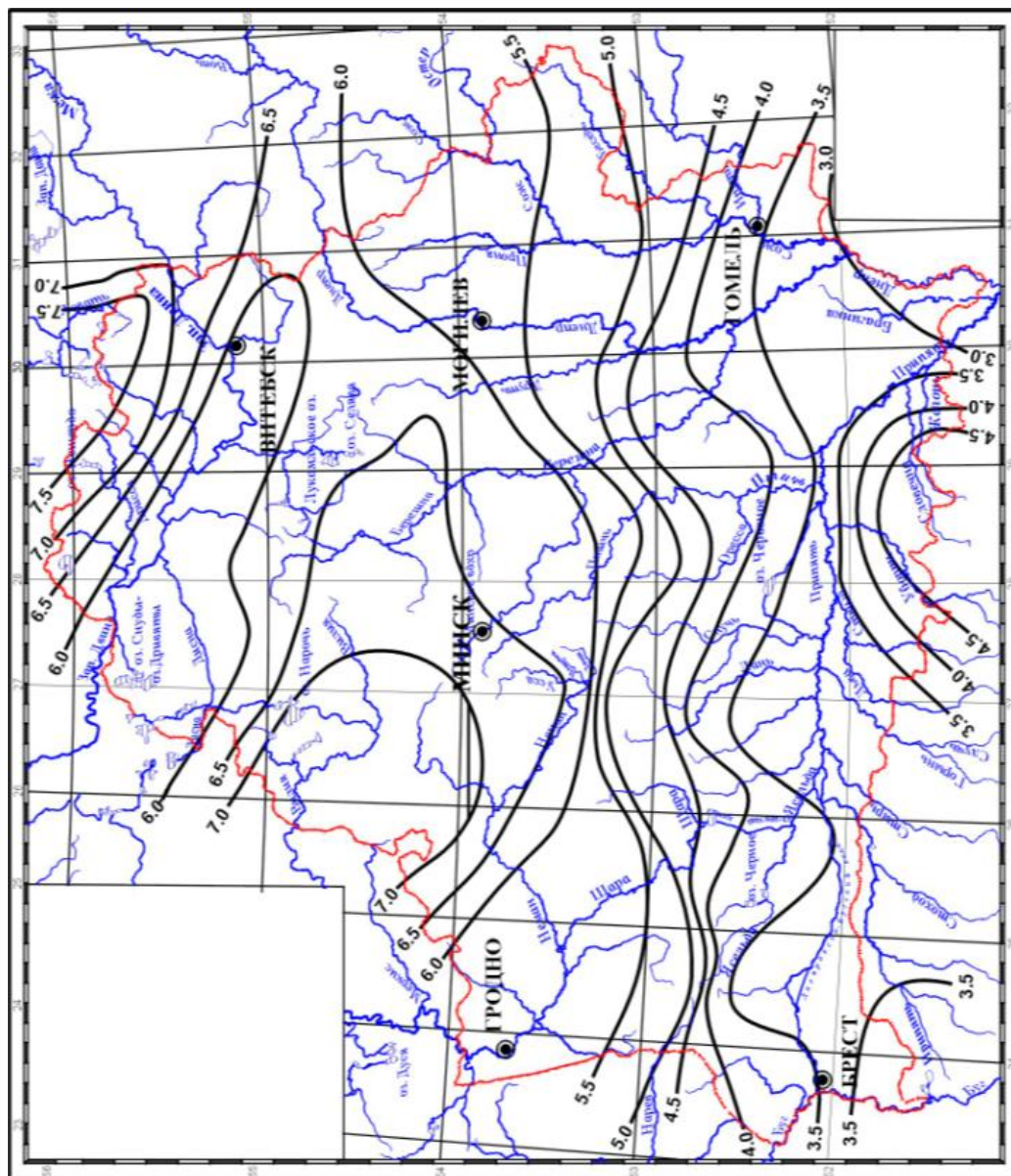
P, %	Коэффициент вариации C_v									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
25	1,07	1,13	1,19	1,25	1,30	1,35	1,39	1,43	1,46	1,48
50	0,998	0,990	0,977	0,958	0,934	0,902	0,862	0,814	0,756	0,690
75	0,931	0,860	0,785	0,708	0,630	0,545	0,460	0,377	0,297	0,223
95	0,840	0,689	0,548	0,419	0,305	0,207	0,130	0,074	0,038	0,018
99	0,780	0,581	0,410	0,268	0,160	0,084	0,038	0,015	0,005	0,001
99,9	0,714	0,474	0,284	0,152	0,066	0,024	0,007	0,001	$3,0 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-5}$
$C_s = 2,0C_v$										
0,01	1,42	1,92	2,52	3,20	3,98	4,85	5,81	6,85	7,98	9,21
0,1	1,34	1,73	2,19	2,70	3,27	3,87	4,56	5,30	6,08	6,91
1	1,25	1,52	1,82	2,16	2,51	2,89	3,29	3,71	4,15	4,60
5	1,17	1,35	1,54	1,74	1,94	2,15	2,36	2,57	2,78	3,00
10	1,13	1,26	1,40	1,54	1,67	1,80	1,94	2,06	2,19	2,30
25	1,06	1,13	1,18	1,23	1,28	1,31	1,34	1,37	1,38	1,39
50	0,997	0,986	0,970	0,948	0,918	0,886	0,846	0,800	0,748	0,693
75	0,931	0,858	0,784	0,708	0,634	0,556	0,489	0,416	0,352	0,288
95	0,842	0,696	0,565	0,448	0,342	0,256	0,181	0,120	0,082	0,051
99	0,782	0,594	0,436	0,304	0,206	0,130	0,076	0,040	0,019	0,010
99,9	0,719	0,492	0,319	0,192	0,107	0,052	0,027	0,008	0,004	0,001
$C_s = 2,5C_v$										
0,01	1,44	1,98	2,67	3,49	4,45	5,54	6,76	8,10	9,55	11,10
0,1	1,35	1,77	2,27	2,85	3,51	4,24	5,04	5,90	6,80	7,76
1	1,25	1,54	1,86	2,21	2,59	3,00	3,42	3,87	4,32	4,78
5	1,17	1,35	1,55	1,74	1,95	2,15	2,35	2,55	2,75	2,94
10	1,13	1,26	1,40	1,53	1,66	1,78	1,90	2,01	2,12	2,22
25	1,07	1,12	1,18	1,22	1,26	1,28	1,31	1,32	1,33	1,33
50	0,997	0,984	0,964	0,938	0,906	0,870	0,830	0,787	0,742	0,695
75	0,931	0,858	0,785	0,712	0,640	0,571	0,505	0,443	0,385	0,332
95	0,843	0,702	0,576	0,467	0,373	0,293	0,227	0,172	0,128	0,093
99	0,784	0,606	0,459	0,341	0,248	0,175	0,120	0,080	0,052	0,032
99,9	0,727	0,513	0,353	0,235	0,151	0,093	0,055	0,030	0,016	0,008

P, %	Коэффициент вариации C_v									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$C_s = 3,0C_v$										
0,01	1,46	2,05	2,83	3,80	4,94	6,26	7,70	9,30	11,00	12,80
0,1	1,36	1,81	2,35	3,01	3,74	4,56	5,44	6,38	7,37	8,41
1	1,25	1,55	1,90	2,26	2,66	3,07	3,50	3,96	4,41	4,87
5	1,17	1,36	1,55	1,75	1,95	2,14	2,34	2,52	2,70	2,88
10	1,13	1,26	1,40	1,52	1,65	1,76	1,87	1,97	2,06	2,15
25	1,07	1,12	1,17	1,21	1,24	1,26	1,28	1,28	1,29	1,29
50	0,997	0,981	0,959	0,930	0,898	0,862	0,823	0,783	0,741	0,699
75	0,931	0,858	0,786	0,715	0,647	0,583	0,522	0,465	0,412	0,363
95	0,844	0,708	0,588	0,487	0,400	0,326	0,263	0,210	0,166	0,129
99	0,786	0,618	0,484	0,369	0,283	0,213	0,158	0,116	0,083	0,058
99,9	0,732	0,531	0,381	0,273	0,192	0,131	0,088	0,057	0,036	0,022
$C_s = 3,5C_v$										
0,01	1,48	2,12	2,99	4,12	5,46	6,94	8,60	10,40	12,30	14,40
0,1	1,37	1,84	2,43	3,14	3,93	4,79	5,75	6,77	7,82	8,90
1	1,25	1,57	1,93	2,31	2,71	3,13	3,56	4,00	4,45	4,90
5	1,17	1,36	1,56	1,75	1,94	2,13	2,31	2,49	2,66	2,83
10	1,13	1,26	1,39	1,52	1,63	1,74	1,84	1,93	2,02	2,10
25	1,07	1,12	1,16	1,20	1,22	1,24	1,25	1,26	1,26	1,26
50	0,997	0,978	0,954	0,925	0,892	0,856	0,819	0,781	0,742	0,703
75	0,931	0,858	0,787	0,719	0,654	0,593	0,536	0,482	0,432	0,386
95	0,840	0,713	0,600	0,504	0,422	0,351	0,290	0,239	0,195	0,158
99	0,788	0,629	0,499	0,396	0,312	0,244	0,186	0,145	0,110	0,082
99,9	0,737	0,548	0,408	0,303	0,224	0,165	0,118	0,083	0,057	0,039
$C_s = 4,0C_v$										
0,01	1,50	2,18	3,17	4,43	5,91	7,58	9,41	11,40	13,40	15,50
0,1	1,38	1,88	2,53	3,29	4,15	5,07	6,05	7,08	8,15	9,26
1	1,25	1,58	1,94	2,31	2,75	3,17	3,59	4,03	4,47	4,91
5	1,17	1,36	1,56	1,75	1,94	2,12	2,29	2,46	2,62	2,78
10	1,13	1,26	1,39	1,51	1,62	1,72	1,81	1,90	1,98	2,05
25	1,07	1,12	1,16	1,19	1,21	1,23	1,24	1,24	1,24	1,24

P, %	Коэффициент вариации C_v									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
50	0,997	0,976	0,950	0,920	0,888	0,853	0,818	0,781	0,744	0,707
75	0,931	0,858	0,788	0,722	0,660	0,601	0,546	0,495	0,448	0,403
95	0,846	0,719	0,611	0,519	0,440	0,372	0,312	0,261	0,217	0,180
99	0,790	0,638	0,516	0,417	0,336	0,269	0,214	0,168	0,132	0,102
99,9	0,742	0,561	0,430	0,331	0,252	0,189	0,141	0,104	0,075	0,054
$C_s = 4,5C_v$										
0,01	1,48	2,26	3,35	4,74	6,36	8,15	10,10	12,20	14,40	16,70
0,1	1,38	1,92	2,61	3,41	4,30	5,25	6,26	7,31	8,40	9,53
1	1,27	1,59	1,97	2,36	2,77	3,19	3,61	4,04	4,47	4,90
5	1,18	1,37	1,56	1,75	1,93	2,10	2,27	2,44	2,59	2,74
10	1,13	1,26	1,39	1,50	1,60	1,70	1,79	1,88	1,95	2,02
25	1,06	1,11	1,15	1,18	1,20	1,21	1,22	1,23	1,23	1,23
50	0,993	0,974	0,947	0,917	0,885	0,851	0,817	0,782	0,746	0,711
75	0,930	0,858	0,790	0,726	0,666	0,609	0,556	0,506	0,460	0,417
95	0,849	0,724	0,620	0,532	0,455	0,388	0,330	0,279	0,235	0,197
99	0,798	0,648	0,530	0,435	0,355	0,289	0,233	0,187	0,149	0,118
99,9	0,746	0,575	0,449	0,352	0,274	0,211	0,161	0,122	0,091	0,067
$C_s = 5,0C_v$										
0,01	1,54	2,34	3,43	4,91	6,65	8,70	10,70	12,71	15,05	—
0,1	1,40	1,95	2,66	3,51	4,44	5,40	6,43	7,54	8,64	—
1	1,27	1,61	1,98	2,38	2,79	3,21	3,65	4,06	4,50	—
5	1,17	1,36	1,55	1,74	1,90	2,08	2,22	2,41	2,54	—
10	1,13	1,26	1,37	1,49	1,60	1,70	1,79	1,86	1,94	—
25	1,06	1,11	1,15	1,17	1,20	1,20	1,20	1,22	1,22	—
50	0,990	0,970	0,940	0,920	0,880	0,850	0,820	0,780	0,750	—
75	0,930	0,860	0,790	0,730	0,670	0,620	0,560	0,510	0,470	—
95	0,840	0,730	0,630	0,550	0,470	0,400	0,340	0,290	0,250	—
99	0,78	0,660	0,550	0,450	0,370	0,310	0,250	0,200	0,160	—
99,9	0,730	0,590	0,470	0,370	0,290	0,230	0,180	0,140	0,100	—
$C_s = 5,5C_v$										
0,01	1,52	2,41	3,70	5,30	7,12	9,10	11,20	13,40	15,80	18,20
0,1	1,40	1,99	2,75	3,62	4,55	5,54	6,56	7,63	8,73	9,87

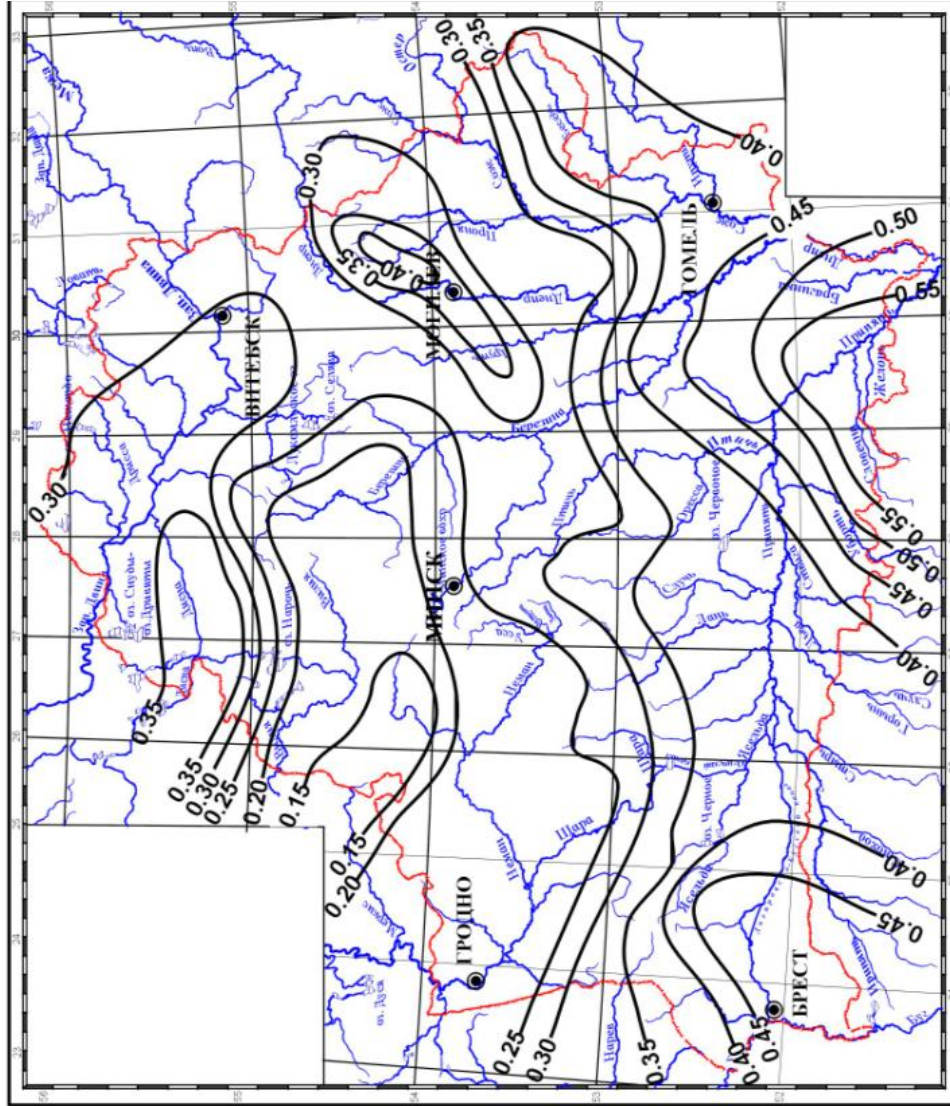
P, %	Коэффициент вариации C_v									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	1,27	1,62	2,00	2,40	2,81	3,21	3,63	4,04	4,46	4,87
5	1,18	1,37	1,56	1,74	1,91	2,08	2,24	2,39	2,54	2,68
10	1,13	1,26	1,38	1,48	1,58	1,68	1,76	1,84	1,91	1,98
25	1,06	1,11	1,14	1,16	1,18	1,20	1,21	1,21	1,21	1,21
50	0,991	0,970	0,942	0,912	0,881	0,850	0,817	0,784	0,751	0,717
75	0,929	0,859	0,794	0,732	0,675	0,621	0,570	0,522	0,478	0,436
95	0,852	0,734	0,637	0,553	0,479	0,413	0,355	0,304	0,260	0,222
99	0,804	0,664	0,555	0,464	0,386	0,319	0,262	0,214	0,175	0,142
99,9	0,757	0,599	0,482	0,388	0,309	0,244	0,191	0,148	0,114	0,088
$C_s = 6,0C_v$										
0,01	1,60	2,48	3,75	5,48	7,30	9,39	11,50	13,80	16,40	—
0,1	1,41	2,02	2,80	3,68	4,58	5,54	6,57	7,63	8,79	—
1	1,29	1,63	2,01	2,40	2,81	3,22	3,63	4,03	4,44	—
5	1,18	1,37	1,55	1,73	1,89	2,05	2,20	2,36	2,51	—
10	1,14	1,26	1,37	1,47	1,56	1,66	1,73	1,82	1,90	—
25	1,07	1,10	1,13	1,16	1,18	1,19	1,20	1,21	1,20	—
50	0,990	0,970	0,940	0,910	0,880	0,850	0,820	0,790	0,750	—
75	0,930	0,860	0,800	0,740	0,680	0,630	0,580	0,530	0,490	—
95	0,850	0,740	0,650	0,560	0,490	0,430	0,370	0,320	0,270	—
99	0,80	0,670	0,570	0,480	0,400	0,330	0,280	0,230	0,190	—
99,9	0,750	0,610	0,500	0,400	0,330	0,260	0,210	0,160	0,120	—

Карта модуля среднего многолетнего годового стока рек Беларуси, л/(с · км²)



Источник: [7].

Карта коэффициента вариации C_v среднего многолетнего годового стока рек Беларуси



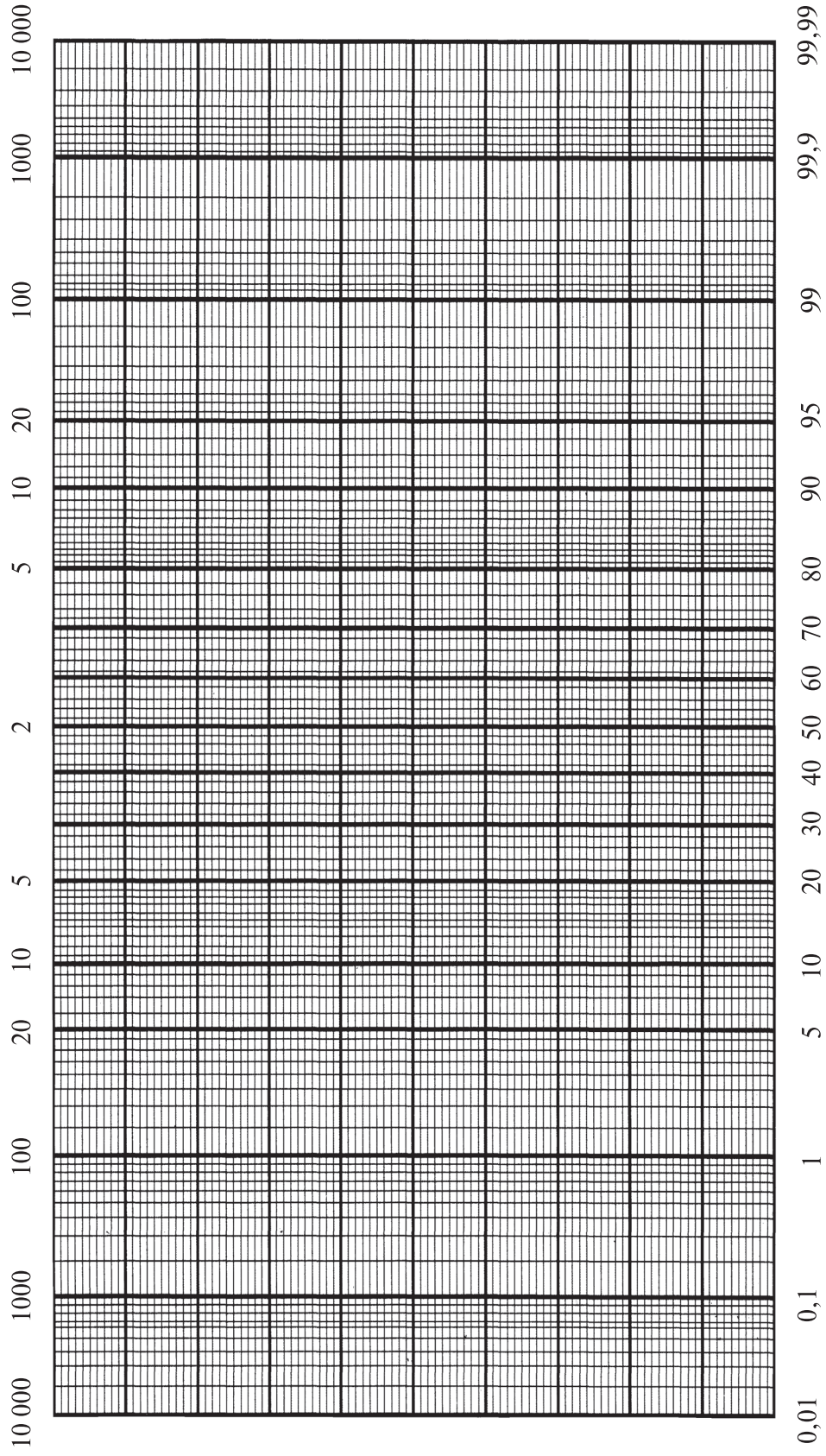
Источник: [7].

Примечание. Для неизученных рек соотношение C_s / C_v принимается равным для рек бассейна Балтийского моря – 2,5; для рек бассейна Черного моря – 2,0.

Приложение 4

Клетчатка вероятностей

Повторяемость, один раз в N лет



Обеспеченность P , %

Учебное издание

Макаревич Александр Александрович

**ГИДРАВЛИКА
И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ**

Учебно-методическое пособие

Редактор *Т. Н. Крюкова*
Дизайн обложки *О. В. Гасюк*
Технический редактор *Т. К. Раманович*
Компьютерная верстка *К. В. Бекиш*
Корректоры *И. Е. Цвирко, Е. В. Гордейко*

Электронный ресурс 7,85 Мб.

Белорусский государственный университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/270 от 03.04.2014.
Пр. Независимости, 4, 220030, Минск.