



УЧЕБНИКИ
И УЧЕБНЫЕ
ПОСОБИЯ
ДЛЯ СТУДЕНТОВ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

А. П. ИСАЕВ
Б. И. СЕРГЕЕВ
В. А. ДИДУР

ГИДРАВЛИКА И ГИДРОМЕХАНИЗАЦИЯ СЕЛЬСКО- ХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Допущено Главным управлением высших учебных заведений при Государственной комиссии Совета Министров СССР по продовольствию и закупкам в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений по специальности «Механизация сельского хозяйства»



МОСКВА ВО «АГРОПРОМИЗДАТ» 1990

ББК 31.5

И85

УДК 631.3:621.22(075.8)

Редактор *А. И. Зелукин*

Рецензенты: доктор технических наук, профессор *М. С. Григоров* и кандидат технических наук, доцент *В. Г. Даев* (Волгоградский СХИ); кандидат технических наук, старший научный сотрудник *В. В. Ведерников* (ВИСХОМ)

Исаев А. П. и др.

И85 Гидравлика и гидромеханизация сельскохозяйственных процессов / А. П. Исаев, Б. И. Сергеев, В. А. Дидур. — М.: Агропромиздат, 1990. — 400 с.: ил. — (Учебники и учебные пособия для студентов вузов).

ISBN 5—10—000764—8

Рассмотрены общие вопросы теории гидравлики, устройство гидравлических машин и вентиляторов. Изложены сведения о средствах механизации. Даны основы гидромелиорации и сельскохозяйственного водоснабжения, сведения о гидропневмотранспорте.

Для студентов по специальности «Механизация сельского хозяйства».

И $\frac{3703000000-423}{035(01)-90}$ 190—90

ББК 31.5+38.77

ISBN 5—10—000764—8

© А. П. Исаев, Б. И. Сергеев,
В. А. Дидур, 1990

ПРЕДИСЛОВИЕ

На протяжении всей своей истории человечество постоянно обращалось к изучению свойств воды с целью использования ее в своих нуждах. В первую очередь — это использование ее для орошения сельскохозяйственных угодий, водоснабжения и других бытовых целей, а затем — использование воды как технического средства для водного транспорта, выработки и передачи энергии на расстояние.

Инженерам-механикам сельскохозяйственного производства, для которых предназначено данное учебное пособие, в своей производственной практике приходится сталкиваться со всеми указанными аспектами использования воды (и других жидкостей), а также применения гидравлических машин и инженерных систем.

Учебное пособие включает разделы: гидравлика, гидравлические машины и вентиляторы, гидропривод, мелиорация и механизация орошения, сельскохозяйственное водоснабжение и гидропневмотранспорт. Каждый из указанных разделов посвящен по существу изложению крупной самостоятельной отрасли науки. В специализированных высших учебных заведениях каждый раздел составляет отдельную самостоятельную дисциплину. Изучение этих вопросов в единой дисциплине представляет серьезную трудность вследствие исключительно краткого изложения материала. В то же время важность и значение рассматриваемой дисциплины резко возрастают. В последние десятилетия в сельском хозяйстве наблюдается быстрое развитие гидромеханизации сельскохозяйственных процессов с многократным увеличением использования разнообразных по назначению и широких по номенклатуре гидравлических систем и машин.

Исключительно важное значение имеют вопросы инженерного использования и охраны водных ресурсов

страны. Важность этих вопросов для инженеров сельскохозяйственного производства становится особо понятной, если учесть, что две трети всего объема воды, потребляемого народным хозяйством страны, приходится на сельское хозяйство.

Учебное пособие в целом впервые охватывает комплекс основных вопросов, связанных с использованием водных ресурсов в сельском хозяйстве и применением гидромашин в сельскохозяйственном производстве.

Разделы 1 и 5 написаны *Б. И. Сергеевым*; глава 1 раздела 2 и раздел 4 — *А. П. Исаевым*; главы 2 и 3 раздела 2 и разделы 3 и 6 — *В. А. Дидуром*.

Авторские права на материал, помещенный в отдельных разделах (главах), осуществляются каждым автором самостоятельно.

Раздел 1. ГИДРАВЛИКА

Глава 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Гидравлика (греч. *hýdōr* — вода и *aulós* — трубка) — наука, изучающая законы равновесия и движения жидкости и методы применения этих законов к решению различных технических задач. Она подразделяется на гидростатику, кинематику и гидродинамику. В гидростатике изучаются законы равновесия жидкостей, в кинематике изучаются связи между геометрическими характеристиками движения и временем (скорости и ускорения), в гидродинамике — законы движения жидкостей с учетом действующих сил.

Гидравлика, опираясь на такие науки, как высшая математика, физика, теоретическая механика, сопротивление материалов в свою очередь служит базой для проектирования турбин, насосов, гидродинамических передач, гидравлических приводов и других гидравлических машин, гидропневмотранспорта, осуществления водоснабжения, канализации, орошения и осушения. Почти во всех областях техники применяются гидравлические устройства, основанные на использовании законов гидравлики.

1.1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ГИДРАВЛИКИ

История развития теорий и вопросов, связанных с движением жидкости, в частности воды, берет свое начало в глубокой древности. Еще древние вавилоняне, египтяне и индусы считали воду началом всех начал и затрачивали огромные усилия, чтобы получить воду. Построенные в доантичный период водопроводы в Древних Афинах и Риме, каналы в долинах Нила, Тигра и Евфрата, плотины в Индии до сих пор поражают своей грандиозностью. Но эти сооружения, видимо, строились на основе опыта, передававшегося из поколения в поколение, и гидравлика являлась ремеслом без каких-либо научных обобщений.

Одним из первых научных трудов по гидравлике считается трактат Архимеда «О плавающих телах» (287—212 гг. до и. э.), в котором был впервые сформулирован гидравлический закон о равновесии тела, погруженного в жидкость.

Хронологически за работами античных ученых следуют экспериментальные и теоретические работы Леонардо да Винчи (1452—1519 гг.), посвященные принципам работы гидравлического пресса, образованию водоворотных областей, отражению и интерференции волн, истечению жидкости через отверстия и водосливы, механизму движения воды в реках и каналах.

Нидерландский математик-инженер Симон Стевин (1548—1620 гг.) написал книгу «Начала гидростатики», в которой определил величину гидростатического давления на плоскую фигуру и объяснил «гидростатический парадокс». Великий итальянский физик, механик и астроном Галилео Галилей (1564—1642 гг.) в трактате «Рассуждения о телах, пребывающих в воде, и о тех, которые в ней движутся» показал, что гидравлические сопротивления возрастают с увеличением скорости и с возрастанием плотности жидкой среды. К числу первых научных сочинений о движении жидкости относятся труды итальянских ученых, учеников Галилея — Кастелли и Торричелли.

Бенедетто Кастелли (1577—1644 гг.) — преподаватель математики в Риме и Пизе — в ясной форме изложил принцип неразрывности потока воды. Выдающийся математик и физик Эванджелист Торричелли (1608—1647 гг.) впервые провел опытные исследования движения жидкости, в результате которых первым предложил формулу для расчета скорости истечения жидкости из отверстий. Формулы расхода и скорости истечения из отверстий, полученные Б. Кастелли и Э. Торричелли, принадлежат к основным формулам современной гидравлики и имеют весьма важное практическое значение.

Выдающийся французский математик и физик Блез Паскаль (1623—1662 гг.) открыл закон о передаче давления внутри жидкости, на котором основано устройство гидравлических прессов, домкратов и других гидравлических машин. Он окончательно решил и обосновал вопрос о вакууме.

Гениальный английский физик, механик, астроном и математик Исаак Ньютон (1643—1727 гг.) сформулировал гипотезу о внутреннем трении в жидкости и установил закон динамического подобия движущихся потоков, широко применяющийся в настоящее время при гидравлических исследованиях в лабораториях.

Перечисленные выше работы крупнейших ученых касались только отдельных разделов гидравлики. Однако формирование гидравлики как самостоятельной науки стало возможным после работ, выполненных в Российской академии наук гениальным ученым М. В. Ломоносовым (1711—1765 гг.), Даниилом Бернулли (1700—1782 гг.) и Л. Эйлером (1707—1783 гг.).

М. В. Ломоносов (1760 г.) в классическом труде «Рассуждения о твердости и жидкости тела» сформулировал закон сохранения

ния вещества и энергии, создал теоретическую базу для развития гидродинамики.

Д. Бернулли (1738 г.) в выдающемся труде «Гидродинамика» теоретически вывел общий закон установившегося движения жидкости, известный под названием уравнения Д. Бернулли.

Л. Эйлер (1755 г.) в сочинении «Общие принципы движения жидкости» составил известные дифференциальные уравнения движения и относительного равновесия жидкости и таким образом создал классическую гидромеханику.

Перечисленные теоретические работы положили начало бурному развитию гидравлики, что, в свою очередь, привело к необходимости изыскания эмпирических расчетных формул, устанавливающих связь между скоростью движения жидкости и сопротивлениями, возникающими при ее движении, а также формул для определения коэффициентов, учитывающих вязкость реальной жидкости.

Наиболее употребляемые формулы были получены: английским профессором О. Рейнольдсом (1883 г.) для ламинарного и турбулентного режимов движения жидкости; французским гидравликом А. Шези (1775 г.) для расчета каналов; французским инженером А. Дарси (1849 г.) для расчета трубопроводов; немецким гидравликом Ю. Вейсбахом (1854 г.) для определения местных потерь напора; русским профессором Н. П. Петровым (1882 г.) для внутреннего трения в жидкости; английским гидравликом Р. Маннингом (1890 г.) и русским академиком Н. Н. Павловским (1925 г.) для определения коэффициента к формуле Шези и многими другими исследователями.

Первыми книгами по гидравлике, изданными на русском языке, считаются «Карманная книжка для вычисления количества воды, протекающей через трубы, отверстия» А. Колмакова (1791 г.) и учебное пособие по гидравлике «Основания практической гидравлики или о движении воды в различных случаях» П. П. Мельникова (1836 г.).

Большой вклад в развитие гидравлики внесли русские ученые и инженеры: Н. Е. Жуковский (1847—1921 гг.) — создатель теории гидравлического удара; И. С. Громека (1851—1889 гг.), разработавший теорию капиллярных явлений и заложивший основы винтовых потоков; Д. И. Менделеев (1843—1907 гг.), сделавший важные выводы о наличии двух режимов движения жидкости (ламинарного и турбулентного); Н. Н. Павловский (1886—1937 гг.) — создатель математической теории фильтрации воды в грунтах и первого в России «Гидравлического справочника»; Б. А. Бахметев (1880—1951 гг.), решивший в общем виде задачу об интегрировании дифференциального уравнения неравномерного движения в призматических руслах.

В последующем развитии современной гидравлики большое место занимают видные советские ученые: И. И. Агроскин, А. П. Ахутин, А. Д. Альтшуль, А. И. Богомолов, В. А. Большаков, С. В. Избаш, П. Г. Киселев, В. М. Макавеев, К. А. Михайлов, М. А. Мостков, Б. Б. Некрасов, М. М. Скиба, С. М. Слисский, С. А. Христианович, М. Д. Чертоусов, Р. Р. Чугаев, Д. В. Штернлихт, А. П. Юфин и др.

1.2. ОСНОВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

Общие сведения. В природе различают 4 агрегатных состояния вещества: твердое, жидкое, газообразное и плазменное. Жидкость занимает промежуточное положение между твердыми телами и газами. Свойства жидкостей при низкой температуре и высоком давлении ближе к свойствам твердых тел, а при высокой температуре и низком давлении — к свойствам газов.

Жидкость, как и всякое жидкое тело, имеет молекулярное строение, т. е. состоит из молекул, объем пустот между которыми намного превосходит объем самих молекул. Причем в жидкостях и твердых телах объем пустот между молекулами меньше, а межмолекулярные силы больше, чем в газах. Поэтому жидкости и твердые тела малосжимаемы по сравнению с газами. Однако, ввиду бесконечной малости молекул и пустот между ними по сравнению с рассматриваемыми объемами жидкости в гидравлике, можно представить жидкость в виде фиктивной сплошной среды, т. е. придать ей свойство непрерывности. Тогда процесс исследования ее упрощается.

Жидкость — это физическое тело, обладающее легкой подвижностью частиц, текучестью и способное изменять свою форму под воздействием внешней силы.

Жидкости разделяются на сжимаемые (газообразные) и несжимаемые или весьма малосжимаемые (капельные). Несмотря на это, различные законы движения капельных жидкостей и газов при некоторых условиях можно считать одинаковыми. Например, при скорости течения газа, значительно меньшей скорости звука, можно сжимаемостью газа пренебречь, как это имеет место в некоторых газопроводах, вентиляционных системах и системах кондиционирования воздуха.

Для облегчения изучения законов движения жидкости введено понятие «идеальные и реальные жидкости».

Идеальные — невязкие жидкости, обладающие абсолютной подвижностью, т. е. отсутствием сил трения и касательных напряжений и абсолютной неизменностью в объеме под воздействием внешних сил.

Реальные — вязкие жидкости, обладающие сжимаемостью, сопротивлением растягивающим и сдвигающим усилиям и доста-

точной подвижностью, т. е. наличием сил трения и касательных напряжений.

Реальные жидкости могут быть ньютоновские и неньютоновские (бингемовские). В ньютоновских жидкостях при движении одного слоя жидкости относительно другого величина касательных напряжений (внутреннего трения) пропорциональна скорости сдвига. При относительном покое эти напряжения равны нулю. Такая закономерность была установлена Ньютоном в 1686 году, поэтому эти жидкости (вода, масло, бензин, керосин, глицерин и др.) называют *ньютоновскими жидкостями*.

Неньютоновские жидкости не обладают большой подвижностью и отличаются от ньютоновских жидкостей наличием касательных напряжений (внутреннего трения) в состоянии покоя. Причем величина их зависит от вида жидкости. Эта особенность была подмечена Ф. Н. Шведовым (1889 г.), а затем Бингемом (1916 г.), поэтому такие жидкости (битум, гидросмеси, глинистый раствор, коллоиды, нефтепродукты при температуре близкой к температуре застывания) получили и другое название — *бингемовские*.

Силы, действующие в жидкости, принято делить на внутренние и внешние. Внутренние силы представляют собой силы взаимодействия частиц жидкости, внешние силы делятся на силы поверхностные и объемные. *Поверхностные силы* (сжатие, давление, растяжение, силы трения) приложены к поверхностям, ограничивающим объем жидкости. *Объемные силы* (например, сила тяжести, сила инерции, электромагнитная сила) распределяются по всему объему жидкости.

Плотность и удельный вес жидкостей. Отношение массы тела M к его объему W называется *плотностью жидкости* ρ :

$$\rho = M/W. \quad (1.1)$$

Удельным весом жидкости γ называется отношение веса жидкости G к ее объему W :

$$\gamma = G/W. \quad (1.2)$$

Если возьмем уравнение, выражающее второй закон Ньютона $G = Mg$, и разделим обе его части на объем W , то получим связь между плотностью и удельным весом:

$$\frac{G}{W} = \frac{M}{W} g \text{ или } \gamma = \rho g, \quad (1.3)$$

где g — ускорение свободного падения, m^2/c .

В табл. 1 приведены численные значения удельного веса и плотности для некоторых жидкостей при температуре $20^\circ C$.

Сжимаемость. При сжатии реальные жидкости незначительно уменьшаются в объеме. Свойство жидкостей изменять объем

1. Параметры жидкостей при температуре 20 °С

Жидкость	Параметр	
	γ , Н/м ³	ρ , кг/м ³
Автомобильный бензин	6990...7470	712...761
Морская вода	10010...10090	1002...1029
Пресная вода	9790	998
Дизельное топливо	8150...8450	831...861
Керосин	7770...8240	792...840
АК-11 масло	9070...9120	925...930
Компрессорное масло	8820...9060	899...924
Креозотное масло	10200...10800	1040...1100
Трансформаторное масло	8700	887
Нефть	8340...9320	850...950
Ртуть	132900	13547
Этиловый безводный спирт	7740	789

при изменении давления характеризуется *коэффициентом объемного сжатия* β_ω , представляющим собой относительное изменение объема жидкости W при изменении давления p на единицу:

$$\beta_\omega = -\frac{1}{W} \frac{\Delta W}{\Delta p}, \quad (1.4)$$

где W — первоначальный объем жидкости, м³; ΔW — изменение объема W при увеличении давления на величину Δp .

Модулем объемной упругости жидкости E_o называется величина, обратная коэффициенту объемного сжатия $E_o = 1/\beta_\omega$. Для воды при атмосферном давлении он составляет около 2000 МПа.

При повышении давления на 0,10 МПа объем воды уменьшается всего лишь на 1/20 000 первоначального объема. Коэффициент объемного сжатия для других капельных жидкостей такого же порядка, поэтому в большинстве случаев сжимаемостью капельных жидкостей можно пренебречь.

Температурное расширение. Это свойство жидкостей изменять свой объем и характеризуется *коэффициентом температурного расширения* β_t , представляющим собой относительное изменение объема жидкости W при изменении температуры t на 1°С и постоянном давлении:

$$\beta_t = \frac{1}{W} \frac{\Delta W}{\Delta t}. \quad (1.5)$$

Коэффициент температурного расширения β_t при $t=20^\circ\text{C}$ и давлении 10^5 Па:

для воды	$0,00015^\circ\text{C}^{-1}$
для спирта	$0,00110^\circ\text{C}^{-1}$
для нефти	$0,00060^\circ\text{C}^{-1}$
для ртути	$0,00018^\circ\text{C}^{-1}$

В реальных условиях жидкости подвержены сравнительно небольшим колебаниям температуры и давления, поэтому объемные изменения будут незначительными.

Вязкость — это способность жидкости оказывать сопротивление скольжению одного слоя относительно другого. Силы, возникающие при скольжении слоев, называют *силами внутреннего трения* или *силами вязкости*. Появление их обусловлено наличием межмолекулярных связей между движущимися слоями. Вязкость характеризует степень подвижности частиц жидкости или текучести (см. таблицу 2).

Согласно гипотезе, высказанной впервые Ньютоном в 1686 г., а затем экспериментально обоснованной профессором Н. П. Петровым в 1863 г., силы внутреннего трения, возникающие между соседними движущимися слоями жидкости, прямо пропорциональны градиенту скорости, площади трущихся слоев и зависят от свойств жидкости, т. е.

$$T = \tau S = \pm \mu S \frac{dU}{dy} \quad \text{или} \quad (1.6)$$

$$\frac{T}{S} = \tau = \pm \mu \frac{dU}{dy}, \quad (1.7)$$

где T — сила трения; S — площадь поверхности трущихся слоев; μ — коэффициент пропорциональности, называемый *динамическим коэффициентом вязкости*, или просто *динамической вязкостью* жидкости, характеризующий вязкость жидкости; τ — касательные напряжения; dU/dy — градиент скорости.

Знак «плюс» или «минус» в формулах (1.6) и (1.7) принимается в зависимости от знака градиента скорости dU/dy .

Из выражения (1.7) можно определить динамическую вязкость

$$\mu = \tau \frac{dy}{dU}.$$

В гидравлических расчетах часто используется *кинематическая вязкость*, равная отношению динамической вязкости μ к плотности ρ жидкости:

$$\nu = \mu / \rho. \quad (1.8)$$

Вязкость жидкостей зависит от температуры. С увеличением температуры вязкость капельной жидкости уменьшается, а вязкость газов, наоборот, возрастает. Объясняется это различием природы вязкости в жидкостях и газах.

Ниже приводятся значения ν для воды при разной температуре t :

$t, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\nu \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}$	179	131	101	80	66	56	48	41	37	33	28

2. Динамическая и кинематическая вязкость при $t=20^\circ\text{C}$ для некоторых жидкостей

Жидкость	Вязкость	
	динамическая μ , Па·с	кинематическая $\nu \cdot 10^4$, м ² /с
Бензин (при 15 °С)	0,0006	0,0083
Пресная вода	0,0010	0,0101
Безводный глицерин	0,512	4,1
Керосин (при 15 °С)	0,0016	0,02
Касторовое масло	0,972	10,02
Минеральное масло	0,0275...1,29	0,313...14,5
Нефть (при 15 °С)	0,007	0,081...0,093
Ртуть	0,0015	0,0011
Спирт этиловый безводный	0,00119	0,0151

Вязкость жидкостей измеряют с помощью приборов-вискозиметров. Для неньютоновских (бингемовских) жидкостей соотношение между касательными напряжениями τ и градиентом скорости dU/dy имеет вид:

$$\tau = \tau_0 \pm \mu dU/dy, \quad (1.9)$$

где τ_0 — касательное напряжение в состоянии покоя.

Движение вязкопластичных жидкостей начинается лишь после того, как внешней силой преодолено напряжение сдвига τ_0 .

Поверхностное натяжение (капиллярность) — свойство, обусловленное силами взаимного притяжения, возникающими между частицами (молекулами) жидкости. Под действием этих сил поверхность жидкости как бы покрывается равномерно напряженной тонкой пленкой, стремящейся придать объему жидкости форму с минимальной поверхностью. Силы поверхностного натяжения развивают молекулярное давление в жидкости, нормальное к ее поверхности.

Влиянием поверхностного натяжения обычно пренебрегают. Однако при изучении потоков с малой глубиной, в капиллярных трубках некоторых измерительных приборов, при решении ряда задач на фильтрацию его необходимо учитывать, так как силой поверхностного натяжения объясняется капиллярное поднятие (при смачивании) или опускание (если нет смачивания) жидкости на высоту, определяемую по зависимости

$$h_{\text{кап}} = \frac{4\sigma \cos \theta}{\rho g d}, \quad (1.10)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения (при $t=20^\circ\text{C}$ и контакте с воздухом σ равен: для воды 0,081 Н/м; для бензина 0,021; для ртути 0,541; для смазочных масел 0,035...0,038 Н/м); d — диаметр капилляра, м; θ — угол между касательной к свободной поверхности в точке пересечения

со стенкой и самой стенкой капилляра (для воды и стекла $\theta \approx 0^\circ$, для ртути и стекла $\theta \approx 50^\circ$).

При температуре 20°C в трубке диаметром d высота капиллярного поднятия для воды, спирта и ртути соответственно равна $30/d$, $10/d$ и $10,15/d$ мм.

Глава 2. ГИДРОСТАТИКА

2.1. ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ И ЕГО СВОЙСТВА

Общие сведения. Раздел гидравлики, рассматривающий законы равновесия жидкости и их практические приложения, называется гидростатикой.

Рассмотрим некоторый объем жидкости, находящейся в равновесии (рис. 1.1). Мысленно разделим этот объем плоскостью $A-B$ на две части и удалим верхнюю часть, заменив ее действие суммарной силой гидростатического давления P , эквивалентной действию верхней отброшенной части на нижнюю. Если эту гидростатическую силу P равномерно распределить по площади ω , то получим среднее гидростатическое давление на площади ω :

$$p_{\text{ср}} = P/\omega. \quad (1.11)$$

Выделим на плоскости $A-B$ элементарную площадку $\Delta\omega$, на которую будет приходиться некоторая сила ΔP . Если будем уменьшать площадку $\Delta\omega$ таким образом, чтобы ее площадь

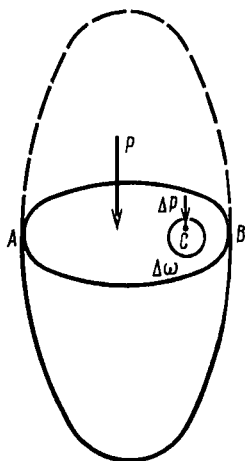


Рис. 1.1. К определению понятия среднего гидростатического давления.

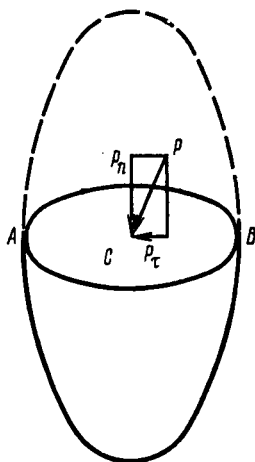


Рис. 1.2. Схема к доказательству первого свойства гидростатического давления.