

**Н.З. Френкель**

**Гидравлика. Учебное пособие**

**Учебник, физика**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 37-053.2  
ББК 74.27я7  
Н11

H11      **Н.З. Френкель**  
Гидравлика. Учебное пособие: Учебник, физика / Н.З. Френкель – М.: Книга по Требованию, 2021. – 452 с.

**ISBN 978-5-458-34147-9**

Учебник предназначается для механических вузов и факультетов. Содержание его соответствует программе по курсу гидравлики, утвержденной МВО для машиностроительных вузов и кроме того, включает ряд вопросов, являющихся важными для инженеров механического профиля и имеющихся в программах ряда вузов.

**ISBN 978-5-458-34147-9**

© Издание на русском языке, оформление

«YOYO Media», 2021

© Издание на русском языке, оцифровка,

«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, кляксы, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



<b>Глава девятнадцатая. Гидравлический удар в трубах .</b>	314
19-1. Определение гидравлического удара . . . . .	314
19-2. Формула Н. Е. Жуковского для давления и крытия задвижки . . . . .	315
19-3. Скорость распространения ударной волны в жидкости по Н. Е. Жуковскому . . . . .	319
19-4. Дифференциальные уравнения гидравлического удара . . . . .	320
19-5. Общий случай гидравлического удара . . . . .	323
19-6. Применение уравнений удара для тупикового трубопровода (гидравлический тупик) . . . . .	328
19-7. Гидравлический таран . . . . .	328
Задача 19-1 . . . . .	330
<b>Глава двадцатая. Истечение жидкости из отверстий и насадков при постоянном напоре .</b>	331
20-1. Истечение жидкости из отверстия при постоянном напоре . . . . .	331
20-2. Истечение жидкости из затопленного отверстия при посто- янном напоре . . . . .	341
20-3. Экспериментальное определение коэффициентов расхода, сжатия, скорости и сопротивления . . . . .	341
20-4. Истечение жидкости из отверстия постоянной ширины в вер- тикальной стенке при постоянном напоре . . . . .	343
20-5. Истечение жидкости из круглого отверстия в вертикальной стенке при постоянном напоре . . . . .	345
20-6. Истечение жидкости через насадки. Внешний цилиндриче- ский насадок . . . . .	346
20-7. Истечение жидкости через коноидальные насадки . . . . .	351
20-8. Истечение жидкости через внутренний цилиндрический на- садок . . . . .	351
20-9. Истечение жидкости через конический сходящийся насадок .	352
20-10. Истечение жидкости через конический расходящийся насадок	353
20-11. Истечение жидкости через распылители . . . . .	354
20-12. Трактория свободной струи. Дальность боя . . . . .	355
Задачи 20-1 — 20-4 . . . . .	360
<b>Глава двадцать первая. Истечение жидкостей из резервуаров при переменных уровнях свободной поверхности. Определение времени опорожнения резервуаров . . . . .</b>	363
21-1. Определение времени опорожнения резервуара. Общий случай	363
21-2. Определение времени истечения жидкости из резервуара с постоянным попечечным сечением по высоте . . . . .	364
21-3. Определение времени истечения жидкости из резервуара с переченным попечечным сечением . . . . .	365
21-4. Графоаналитический метод определения времени слива . . . . .	369
Задачи 21-1 — 21-3 . . . . .	370
<b>Глава двадцать вторая. Сопротивление жидкости движущемуся в ней телу . . . . .</b>	375
22-1. Силы, действующие на тело, движущееся в жидкости . . . . .	375
22-2. Сопротивление трения . . . . .	376
22-3. Сопротивление давления . . . . .	377
22-4. Волновое сопротивление . . . . .	385
Задача 22-1 . . . . .	386
<b>Глава двадцать третья. Взаимодействие потока жидкости с твер- дым телом . . . . .</b>	387
23-1. Сила взаимодействия жидкости с поверхностью, движущейся равномерно, поступательно и прямолинейно . . . . .	387

23-2. Сила действия потока жидкости на неподвижное колено, образующее угол $90^\circ$	390
23-3. Сила действия свободной струи на неподвижную верхность	391
23-4. Сила действия свободной струи на исподвижную поверхность	392
23-5. Сила действия свободной струи на поверхности, движущиеся поступательно, прямоилинейно и равномерно	393
23-6. Мощность струи, действующей на поверхности, движущиеся поступательно, прямоилинейно и равномерно	395
23-7. Индикаторная мощность потока жидкости, действующего на поверхность, врачающуюся с постоянной угловой скоростью вокруг неподвижной оси	397
23-8. Взаимодействие жидкости с телом крылового профиля. Теорема Н. Е. Жуковского о подъемной силе.	400
<b>Задачи 23-1 — 23-2</b>	<b>405</b>
<b>Глава двадцать четвертая. Беззапорное установившееся движение жидкости . . . . .</b>	
24-1. Дифференциальное уравнение установившегося беззапорного потока	409
24-2. Равномерное движение	410
24-3. Скоростной коэффициент	412
24-4. Гидравлически наивыгоднейшее сечение канала	414
24-5. Допускаемые скорости	417
<b>Задачи 24-1 — 24-2</b>	<b>417</b>
24-6. Дифференциальное уравнение неизномерного плавно изменяющегося установившегося движения жидкости. Критическая глубина	419
24-7. Энергия сечения	420
24-8. Формы свободной п	422
24-9. Уравнение прыжка	423
24-10. Интегрирование дифференциаль	425
<b>Глава двадцать пятая. Водосливы</b>	
25-1. Классификация водосливов	428
25-2. Движение жидкости через водослив с тонкой стенкой	428
25-3. Основная расчетная формула водослива с тонкой стенкой	431
25-4. Движение жидкости через водослив с широким порогом	433
25-5. Основная расчетная формула водослива с широким порогом	434
25-6. Движение жидкости через водослив практического профиля	436
25-7. Расчетные формулы для определения коэффициента расхода водосливов	436
<b>Глава двадцать шестая. Гидравлика газов</b>	
26-1. Уравнение равновесия газа. Стандартная атмосфера	440
26-2. Уравнение Бернулли для элементарной струйки идеального газа при установившемся движении. Уравнение изразрытии	442
26-3. Скорость звука в газе	444
26-4. Истечение газа через насадок	445
26-5. Расчет газопроводов	449
<b>Задачи 26-1 — 26-3</b>	<b>451</b>

# ВВЕДЕНИЕ В ГИДРАВЛИКУ

---

## *Глава первая*

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИКИ, ЕЕ МЕТОД И МЕСТО, ЗАНИМАЕМОЕ ЕЮ СРЕДИ ДРУГИХ ДИСЦИПЛИН**

Современная гидравлика является технической наукой. Предметом гидравлики служат жидкости и законы, действующие в них и используемые преимущественно при решении разнообразных вопросов инженерной практики, как, например, при расчетах потоков в трубопроводах, гидротехнических сооружений, гидравлических машин и т. п.

Под жидкостями будем понимать как жидкости почти несжимаемые, т. е. капельные (вода, масло, бензин и т. п.), так и жидкости сжимаемые, т. е. газы. Такое широкое определение понятия жидкого тела допустимо потому, что многие гидравлические закономерности являются аналогичными как для капельных жидкостей, так и для газов, благодаря этому весьма важные явления и в капельных жидкостях и в газах описываются одинаковыми и теми же уравнениями.

Гидравлика делится на две части: на гидростатику и гидродинамику. Гидростатика изучает законы равновесия жидкостей и действий на соприкасающиеся с ними твердые тела. Гидродинамика изучает законы движения жидкостей и взаимодействие их с соприкасающимися с ними покоящимися или движущимися твердыми телами.

Своими исследованиями гидравлика способствует развитию материалистического естествознания, стремящегося к познанию объективных законов движения материи. Поэтому гидравлику иногда рассматривают как одну из отраслей естествознания.

Широкое использование в народном хозяйстве гидравлических машин, механизмов и других устройств, в которых жидкость является рабочим телом, требует от инженеров механических специальностей серьезных знаний в области гидравлики.

Являясь основной дисциплиной, часто единственной во всем учебном плане, в которой студент изучает основы механики жидкого тела, гидравлика приобретает особо большое значение для специалистов машиностроителей, гидромашиностроителей, а также для специалистов по гидротехнике, водопроводу, канализации и т. п.

лизации. Велико значение гидравлики в вопросах механизации и автоматизации производственных процессов. Для значительного числа технических дисциплин гидравлика является базой, без знания которой изучение их невозможно.

Слово «гидравлика» происходит от сочетания двух греческих слов *ὕδωρ* (хюдор) — вода и *αὐλός* (аулос) — труба, что свидетельствует о важности и в прошлом для гидравлики вопросов, относящихся к движению жидкостей по трубам. Круг вопросов современной гидравлики весьма велик, причем вопросы, касающиеся движения жидкости по трубам, и в настоящее время являются одними из основных ее вопросов.

Зародившаяся в глубокой древности еще в недрах общегреческой науки<sup>1</sup> гидравлика оформляется в самостоятельную науку лишь в начале мануфактурного периода капитализма<sup>2</sup>. К этому времени «...промышленность колossalно развилась и вызвала к жизни массу новых механических..., химических... и физических фактов...»<sup>3</sup>. Однако теоретические основы гидравлики были созданы лишь в конце XVII и середине XVIII вв. выдающимися работами Исаака Ньютона (1642—1727 гг.) и членов Петербургской академии наук Даниила Бернулли (1700—1782 гг.), Михаила Васильевича Ломоносова (1711—1765 гг.), Леонарда Эйлера (1707—1783 гг.).

Научную базу современной гидравлики составляют общие законы физики, особенно теоретической механики, а также закон Ломоносова о сохранении материи и движения. Важнейшим принципом гидравлики является принцип непрерывности Эйлера, в основу которого положено представление о жидкости как о непрерывной среде (континууме), допускающей неограниченную делимость ее материальных частичек. Согласно этому принципу такие важные для гидравлических исследований величины, как плотность, давление, количество движения, кинетическая энергия и т. д., выражаются в виде функциональных зависимостей, не имеющих в исследуемых объемах жидкости разрывов непрерывности<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Из древних ученых нужно отметить занимавшегося вопросами гидравлики греческого философа Архимеда, жившего с 287 по 212 г. до нашей эры. Архимед в трактате «О плавающих телах» сформулировал открытый им один из основных законов гидростатики „Закон Архимеда“.

<sup>2</sup> Из ученых этого периода следует отметить Симона Стивина (1548—1620 гг.), Галилео Галилея (1564—1642 гг.), Эванджелиста Торричелли (1608—1647 гг.), Блеза Паскаля (1623—1662 гг.). Есть основания предполагать, что существенное влияние на создание основ гидравлики имел Леонардо да Винчи (1452—1519 гг.), занимавшийся изучением вопросов плавания, истечения жидкостей из отверстия, сопротивления жидкостей движущимся телам, движением жидкостей по трубам и каналам и т. п.

<sup>3</sup> Фридрих Энгельс. Диалектика природы, ГИПЛ, 1953, стр. 145.

<sup>4</sup> Случай, не удовлетворяющие этому принципу, являются особыми и в учебнике не исследуются.

Сложность явлений, происходящих в движущейся жидкости, и невозможность во многих случаях исследования их только теоретически, а также необходимость проверки теоретических положений заставляют гидравличиков широко использовать эксперимент, основанный на методах подобия, являющихся в настоящее время одними из наиболее эффективных средств исследования<sup>1</sup>.

Таким образом, методом гидравлики является совокупность аналитических и экспериментальных способов исследования гидравлических явлений.

Вопросами, родственными гидравлике, занимается и теоретическая гидромеханика, основоположником которой является Леонард Эйлер. В отличие от гидравлики теоретическая гидромеханика исследует вопросы, имеющие отношение не только к технике, значительно шире использует математические методы исследования и в меньшей степени, чем гидравлика, опирается на эксперимент. Однако все большее проникновение современной теоретической гидромеханики в область прикладных вопросов со все большим использованием экспериментальных методов исследования, так же как и широкое применение гидравликой гидромеханических методов исследования, стирает различие между этими двумя науками, по существу занимающимися изучением одних и тех же законов<sup>2</sup>.

Своему развитию современная гидравлика обязана и выдающимся представителям инженерного дела. Большие гидротехнические работы, связанные с сооружением гидростанций, каналов, водопроводов, а также развитие кораблестроения, машиностроения и особеню гидромашиностроения способствовали открытию важных гидравлических закономерностей<sup>3</sup>.

В нашей стране расцвет всех наук, в том числе и гидравлики, стал возможен лишь после победы Великой Октябрьской социалистической революции, когда Советская власть обобщила средства производства, сделала их собственностью всего народа и

<sup>1</sup> Основы теории подобия были созданы еще И. Ньютона и дальнейшее развитие получили в трудах Осборна Рейнольдса (1842—1912 гг.), Виктора Львовича Кирпичева (1845—1913 гг.) и др.

<sup>2</sup> Огромный вклад в развитие теоретической гидромеханики внесли Жозеф Лагранж (1736—1813 гг.), Герман Гельмгольц (1821—1894 гг.), Луи Навье (1785—1836 гг.), Адемар Сен-Венан (1797—1886 гг.), Георг Стокс (1819—1903 гг.) и многие другие, а из русских ученых Ипполит Степанович Громека (1851—1889 гг.), Николай Егорович Жуковский (1847—1921 гг.), Сергей Алексеевич Чаплыгин (1869—1942 гг.) и многие другие.

<sup>3</sup> Здесь следует отметить Антуана Шези (1718—1798 гг.), Дарси (1803—1858 гг.), Юлиуса Вейсбаха (1806—1871 гг.), Базена (1829—1917 гг.), а из русских и советских ученых Диогрия Ивановича Менделеева (1834—1907 гг.), Алексея Николаевича Крылова (1863—1945 гг.), Владимира Григорьевича Шухова (1853—1939 гг.), Николая Егоровича Жуковского, Николая Павловича Петрова (1836—1920 гг.), Николая Николаевича Павловского (1884—1937 гг.), Леонида Самуиловича Лейбензона (1879—1951), а также Б. А. Бахметева, М. А. Великанова, А. Я. Миловича, И. Г. Есьмана и др.

тем уничтожила систему эксплуатации, создала социалистические формы хозяйства. Перед советскими учеными Коммунистической партией и Советским правительством были поставлены проблемы исключительной важности, разрешение которых должно было способствовать созданию материально-технической базы коммунистического общества.

Огромное строительство, ведущееся в нашей стране, является неисчерпаемым источником, питающим многочисленные области советской науки и, в частности, советскую гидравлику. Оно способствует успешному изучению многих гидравлических явлений, созданию совершенных методов исследования рабочих процессов в гидравлических машинах и т. д.

Одной из первых крупнейших работ советского периода развития гидравлики являются работы акад. Н. Н. Павловского. В 1922 г. Н. Н. Павловский развивает теорию Н. Е. Жуковского и создает общую теорию неравномерного движения жидкости в пористой среде. Тогда же Н. Н. Павловский разрабатывает методы исследований гидравлических явлений путем электрогидродинамических аналогий (метод ЭГДА). Этот метод основан на аналогичности дифференциальных уравнений, относящихся как к гидродинамическим, так и электрическим явлениям. Так, например, движение жидкости в группе под плотиной исследуется путем измерения напряжения электрического поля на модели сооружения. Метод ЭГДА может применяться также для исследования обтекания тел. К достижениям советских ученых следует отнести работы И. И. Агроскина и М. Д. Чертоусова по теории неравномерного движения жидкости в открытых руслах, разработанную акад. С. А. Христиановичем теорию неуставновившегося движения жидкостей в каналах, акад. Л. С. Лейбензоном теорию движения природных жидкостей и газов в пористой среде, которая явилась продолжением исследований Н. Е. Жуковского.

В изучении неуставновившихся процессов в трубопроводах значительные результаты достигнуты М. А. Мостковым, Н. А. Карцевишили, А. А. Суриным, И. А. Чарным и др.

Большие успехи были достигнуты в изучении турбулентного движения М. А. Великановым, Л. Н. Колмогоровым, Л. Г. Лойцянским, А. Л. Фридманом и др.<sup>1</sup>.

Значительное развитие в трудах А. Н. Ахтутина, Н. М. Бернадского, Е. А. Замарина, И. И. Леви, Н. М. Мастицкого, Н. Н. Павловского, Ф. И. Пикалова, П. Я. Полубариновой-Кочиной, Л. Н. Рахманова и др. получили вопросы так называемой инженерной гидравлики, под которой часто подразумеваются разделы гидравлики, связанные с расчетами гидротехнических устройств (плотин, каналов и т. д.).

<sup>1</sup> По вопросам турбулентности в свое время мировую известность получили исследования Буссинеска (1897 г.), О Рейнольдса (1883—1885 гг.), Т. Кармана (1930 г.), Л. Тейлора (1932 г.), Л. Приндля (1932 г.) и др.

Советскими гидравликами уделяется большое внимание исследованию законов гидравлических сопротивлений. Особенно широкой известностью в Советском Союзе для так называемой квадратичной зоны гидравлических сопротивлений пользуется формула Н. Н. Павловского, созданная им еще в 1925 г. В практике гидравлических расчетов получила распространение формула И. И. Агроскина, предложенная в 1950 г. Наряду с формулами иностранных исследователей (Кольбрука и Уайга и др.) в настящее время получают применение для расчета трубопроводов формулы советских исследователей (А. Д. Альтшуля, И. А. Исаева, П. Н. Конакова, Н. З. Френкеля, Ф. А. Шевелева и др.). Большой вклад внесли А. П. Юфин, В. С. Клороз, Г. Н. Роер в исследование вопросов, связанных с гидромеханикой.

Выполнение пятилетних планов развития народного хозяйства с уверенностью говорит о преимуществах советского государственного и общественного строя перед капиталистическим и является доказательством того, что задачи, стоящие перед советскими учеными и инженерами, успешно ими выполняются.

Работы советских гидравиков, как и всех советских ученых, руководимых Коммунистической партией и Советским правительством и вооруженных марксистско-ленинским мировоззрением, направлены на дальнейшее развитие народного хозяйства, на неуклонное улучшение жизни советского народа.

Успехи советских гидравиков будут способствовать более быстрому осуществлению великой и благородной цели советского народа — построению коммунизма в нашей стране.

## Глава вторая

### ГЛАВНЕЙШИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ В НИХ

#### 2-1. Капельные жидкости и газы

*Жидкостью называется физическое тело, обладающее текучестью и не имеющее своей формы, но принимающее форму сосуда, в котором оно находится. Текучестью называется способность жидкости изменять свою форму, не дробясь на части, под действием даже небольших сил.*

Жидкости делятся на два класса: на капельные и газы. К капельным жидкостям относятся вода, масло, бензин и т. п. Эти жидкости способны образовывать капли; они имеют собственный объем и по сравнению с газами мало сжимаемы. Капельная жидкость, если ее объем меньше объема сосуда, всегда занимает часть его. В этом случае она имеет поверхность раздела капель-

ной жидкости с газом, называемую свободной поверхностью. Газ распространяется по всему объему сосуда<sup>1</sup>.

Жидкость называют идеальной в тех случаях, когда при исследовании пренебрегают теми или другими, важными для исследуемого вопроса, ее физическими свойствами. В дальнейшем будем называть жидкость идеальной, если пренебрежем ее вязкостью.

В гидравлике жидкость рассматривается как среда, непрерывным образом заполняющая некоторое пространство, т. е. как континуум, вследствие чего ее любой бесконечно малый объем рассматривается как физическое тело<sup>2</sup>.

Принимая жидкость за континуум, вместе с тем надо отличать жидкости однородные, т. е. с одинаковым распределением массы по объему, от неоднородных жидкостей, т. е. жидкостей с неодинаковым распределением массы по объему. Примером неоднородной жидкости может служить любой газ, хотя при малых изменениях давления практически возможно и его рассматривать как однородную жидкость<sup>3</sup>.

Распределение массы жидкости по объему характеризуется плотностью или объемным весом (см. § 2-3).

## 2-2. Силы, действующие в жидкости

При выводе различных гидравлических зависимостей приходится составлять уравнения движения или покоя жидкости и

<sup>1</sup> Согласно современным воззрениям в капельной жидкости существует решетчатое расположение ее молекул, но в отличие от кристаллической решетки твердого тела решетка капельной жидкости не имеет правильной формы. В своем тепловом движении молекулы капельной жидкости под влиянием действующих между ними сил большую часть времени совершают дрожания около некоторых положений равновесия (находятся в состоянии «соседней жизни») и этим напоминают колебания молекул твердого тела. Время оседлой жизни молекулы равно  $10^{-10}$  сек. За это время молекула успевает совершить от 100 до 10 000 колебаний. Некоторым молекулам удается случайно пабрь энергию и вырваться из своего окружения, переселившись в другое место. На новом месте молекула снова приходит в движение, имеющее характер дрожаний. Траектория, описываемая молекулой при ее неоднократном переселении, представляет лочаную липию, напоминающую траекторию молекулы газа в ее тепловом движении.

Течение жидкости возникает только при действии на жидкость внешних сил. Однако время действия этих сил должно быть больше времени осадкой жизни. В противном случае жидкость придет в напряженное состояние, аналогичное твердому телу.

<sup>2</sup> Это возможно благодаря тому, что размеры рассматриваемых в гидравлике частиц жидкости всегда велики по сравнению со средней длиной свободного пробега молекулы жидкости.

<sup>3</sup> В теоретической гидромеханике жидкость называется однородной, если во всем ее объеме она удовлетворяет одному и тому же уравнению состояния. С этой точки зрения один и тот же газ всегда будет представлять однородную жидкость.

включать в эти уравнения различные силы, действующие на рассматриваемые элементы жидкости и являющиеся по отношению к ним внешними силами. Эти силы делятся на силы массовые и силы поверхностные.

*Массовыми называются силы, величина которых пропорциональна массе жидкости.* К массовым силам относится сила тяжести и силы инерции (Даламбера, переносная, Кориолиса). Каждая из этих сил инерции вводится в рассмотрение в зависимости от того, каким методом решается та или иная задача, что должно быть хорошо известно из курса теоретической механики. Напомним лишь, что силы инерции равны произведению масс на соответствующие ускорения и направлены в сторону, им противоположную.

В однородной жидкости сила тяжести и силы инерции оказываются пропорциональными объемам и именуются в этом частном случае объемными силами.

*Поверхностными называются силы, величина которых пропорциональна площади той поверхности, на которую эти силы действуют.* Рассмотрим их.

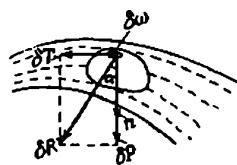
Для этого выделим в потоке жидкости (фиг. 2-1) некоторый объем, ограниченный произвольной поверхностью. На поверхность рассматриваемого объема со стороны окружающей его жидкости или со стороны соприкасающихся с объемом стенок канала или сосуда действуют силы. По отношению к рассматриваемому объему эти поверхностные силы являются внешними.

Обозначим через  $\delta R$  поверхностьную силу, с которой окружающая жидкость или стенка действует на элементарную площадку  $\delta \omega$  указанной поверхности. Сила  $\delta R$  в общем случае может быть направлена как внутрь рассматриваемого объема под углом  $\alpha$  к направлению нормали  $n$ , так и вовне.

Разложим силу  $\delta R$  на две составляющие: на  $\delta P$  по направлению, совпадающему с нормалью  $n$ , и  $\delta T$  — по направлению касательной к площадке.

Силу  $\delta P$  назовем нормальной силой. Она может быть сжимающей силой — силой давления или растягивающей — силой растяжения. Силу  $\delta T$  назовем касательной силой или силой трения.

Силы трения обусловливаются деформацией жидкого объема и возникают только в движущейся жидкости. Силам трения будут посвящены отдельные параграфы. Здесь рассмотрим подробнее нормальные силы. Эти силы характеризуются нормальным напряжением в данной точке. Величина среднего



Фиг. 2-1. Схема разложения поверхности силы на силу трения и силу давления.

нормального напряжения на данной элементарной площадке равна отношению  $\frac{\delta P}{\delta \omega}$  к  $\delta \omega$ :

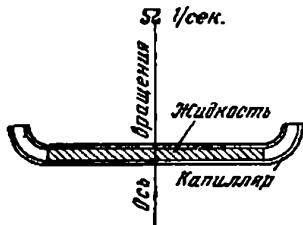
$$\rho_{cpn} = \frac{\delta P}{\delta \omega} [\kappa\Gamma/m^2]^*. \quad (2-1)$$

*Абсолютным напряжением в точке в направлении  $n$  называется предел, к которому стремится среднее нормальное напряжение, соответствующее площадке  $\delta \omega$  с нормалью  $n$ , когда величина площадки стремится к нулю:*

$$\rho_n = \lim_{\delta \omega \rightarrow 0} \rho_{cpn} = \lim_{\delta \omega \rightarrow 0} \frac{\delta P}{\delta \omega}, \quad (2-2)$$

$$\rho_n = \frac{dP}{d\omega} [\kappa\Gamma/m^2]. \quad (2-3)$$

Напряжение измеряется в  $\kappa\Gamma/m^2$  и т. п. Напряжение может быть как сжимающим, т. е. давлением, так и растягивающим.



Фиг. 2-2. Жидкости не выбираются из врачающегося капилляра вследствие способности воспринимать растягивающие усилия

Способность жидкости воспринимать сжимающие усилия (давления) ничем не ограничена. Этого нельзя сказать о растягивающих усилиях. Газы вообще не способны их воспринимать. Капельные же жидкости, как доказано современными исследованиями, обладают способностью воспринимать достаточно большие растягивающие усилия.

Особенно наглядно это можно наблюдать на следующем примере. Открытый с обоих концов стеклянный капилляр (фиг. 2-2) заполняется жидкостью и приводится во вращение вокруг вертикальной оси, проходящей через его середину. Благодаря вращению в жидкости возникает стремление быть выброшенной с обе стороны из капилляра. Однако даже при большой угловой скорости вращения  $\Omega$  жидкость не выбрасывается, что свидетельствует о ее способности воспринимать возникающие при этом растягивающие усилия. При подобных опытах удавалось достичнуть, например, в воде растягивающих напряжений до  $280 \text{ кГ/см}^2$ . Таким образом, капельная жидкость обладает прочностью на разрыв и в этом отношении похожа на твердое тело.

Однако в практических условиях благодаря загрязнению жидкости и наличию в жидкости растворенного воздуха сопротивляемость ее растягивающим усилиям незначительна. В гидравлических расчетах считают, что предел прочности капель-

\* Отметим здесь (для исключения повторений в дальнейшем), что при определении размерных величин всегда будет указываться их размерность для того, чтобы только подчеркнуть их физический смысл в одной какой-либо системе единиц.