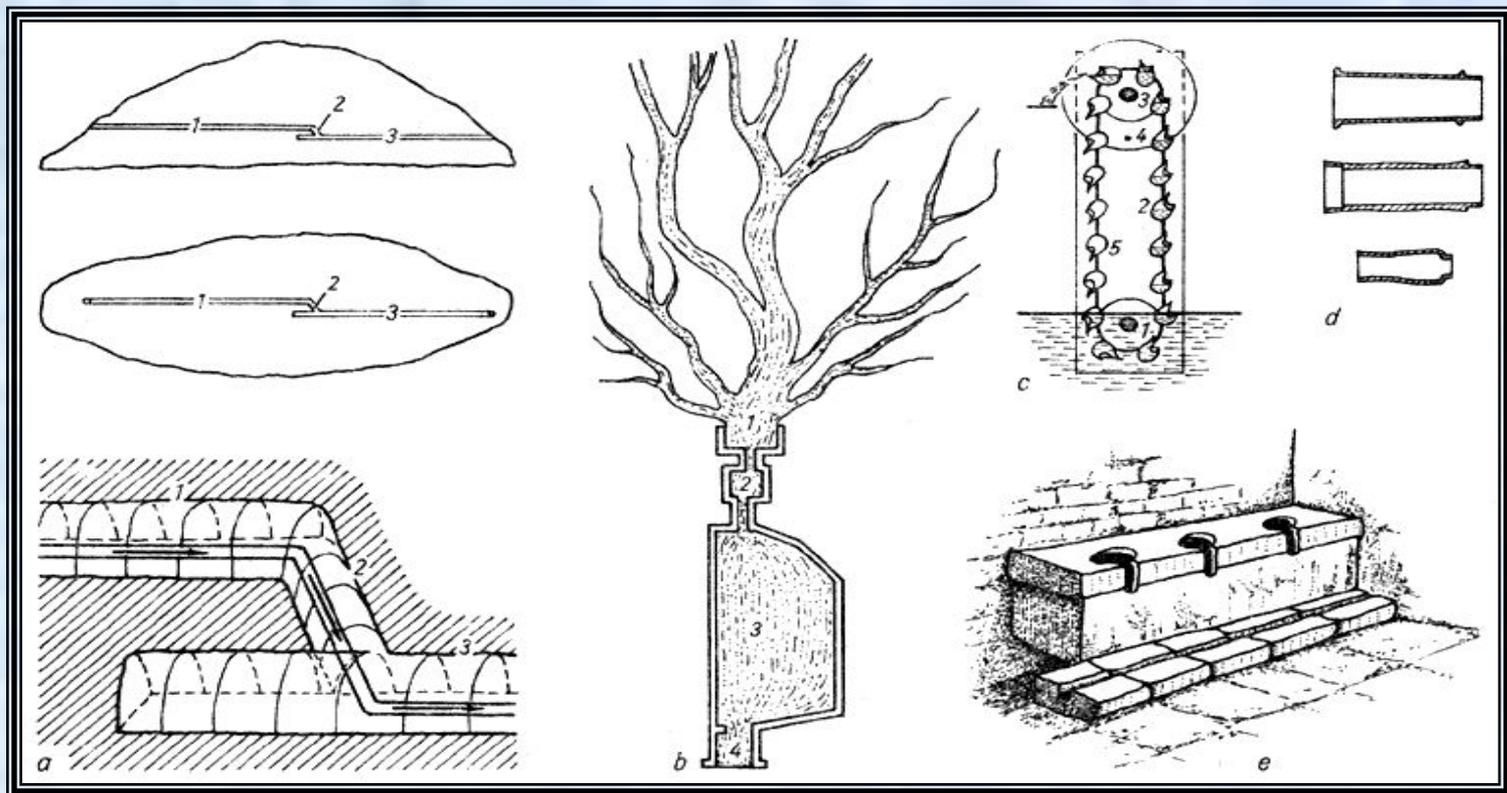


# **ГИДРАВЛИКА**

- **ГИДРАВЛИКА** – наука, изучающая законы равновесия и механического движения жидкостей и разрабатывающая методы применения этих законов для решения различных прикладных задач.
- Название “гидравлика” произошло от греческих слов **hydraulikós** – водяной, от **hydor** – вода и **aulos** – трубка, желоб.

- ***Цель изучения дисциплины*** – получение необходимых знаний в области гидравлики и овладение основами инженерных методов расчетов проводимых для проектирования, строительства, правильной эксплуатации и реконструкция водохозяйственных гидротехнических сооружений, предназначенных для использования водных ресурсов рек, озёр, морей, подземных вод, их охраны от загрязнений, а также для борьбы с разрушительным действием водной стихии.
- **Будущий специалист должен знать**
  - основные законы гидростатики и гидродинамики,
  - физические свойства жидкостей и их характеристики,
  - виды движений жидкости, основные гидравлические параметры потока,
  - режимы движения жидкости,
  - теорию определения потерь напора и истечения жидкости через отверстия, насадки, затворы и короткие трубы,
  - гидравлические расчеты трубопроводов, каналов и водосливов,
  - особенности расчета распространения примесей в водотоках и водоемах и основы теории фильтрации жидкости в пористых средах, которые приведены в последней главе пособия.



- a** — туннель Эвпалина. *Сверху*: продольный разрез и очертания туннеля водопровода о. Самоса, *внизу*: разрез туннеля в месте соединения обеих штолен (реконструкция по Х. Вильсдорфу и другим источникам): 1 — верхняя штольня, проведенная от источника по направлению к городу, 2 — поперечная штольня, 3 — нижняя штольня (указано направление на город);

**b** — запруда для обогащения руды в горнорудном бассейне Лавриона: 1 — запруда, 2 — отстойник глубиной 3 м, 3 — резервуар глубиной 1,5 м, 4 — выпуск воды для промывки руды;

**c** — **поперечный разрез ковшового элеватора**, использовавшегося в качестве корабельной помпы: 1 — находящийся в воде нижний барабан, 2 — наполненные ковши, укрепленные на туго натянутой цепи, 3 — верхний барабан, 4 — место прикрепления рукояти маховика, 5 — пустые ковши, движущиеся на цепи вниз (находки в оз. Неми);

**d** — **конические глиняные трубы, вставляющиеся друг в друга**;

**e** — **ватерклозет над коллектором сточных вод**, перед ним — желобки со свежей водой для мытья рук (со схемы в Римско-германском центральном музее, Майнц).



- Гарский мост – 3-ярусный акведук **Понт-дю-Гар** во Франции. Этот мост через р. Гар представляет собой массивный арочный акведук **длиной 275 м и высотой 50 м**. Он был сооружен примерно 2000 лет назад как составная часть 50-километрового водовода, поставлявшего питьевую воду в древнейший на нынешней французской территории римский город Ним (Немаус). Нижний ярус состоит из шести больших арок, средний - из 11 таких же арок, а верхний - из 35 арок меньшего размера: здесь и проходила водоводная труба.



- Акведук Валента был сооружён в период правления императора Валента (364-378). Его первоначальная длина составляла один километр, однако до настоящего времени уцелели лишь 800 метров этого впечатляющего сооружения

# Клоака Максима

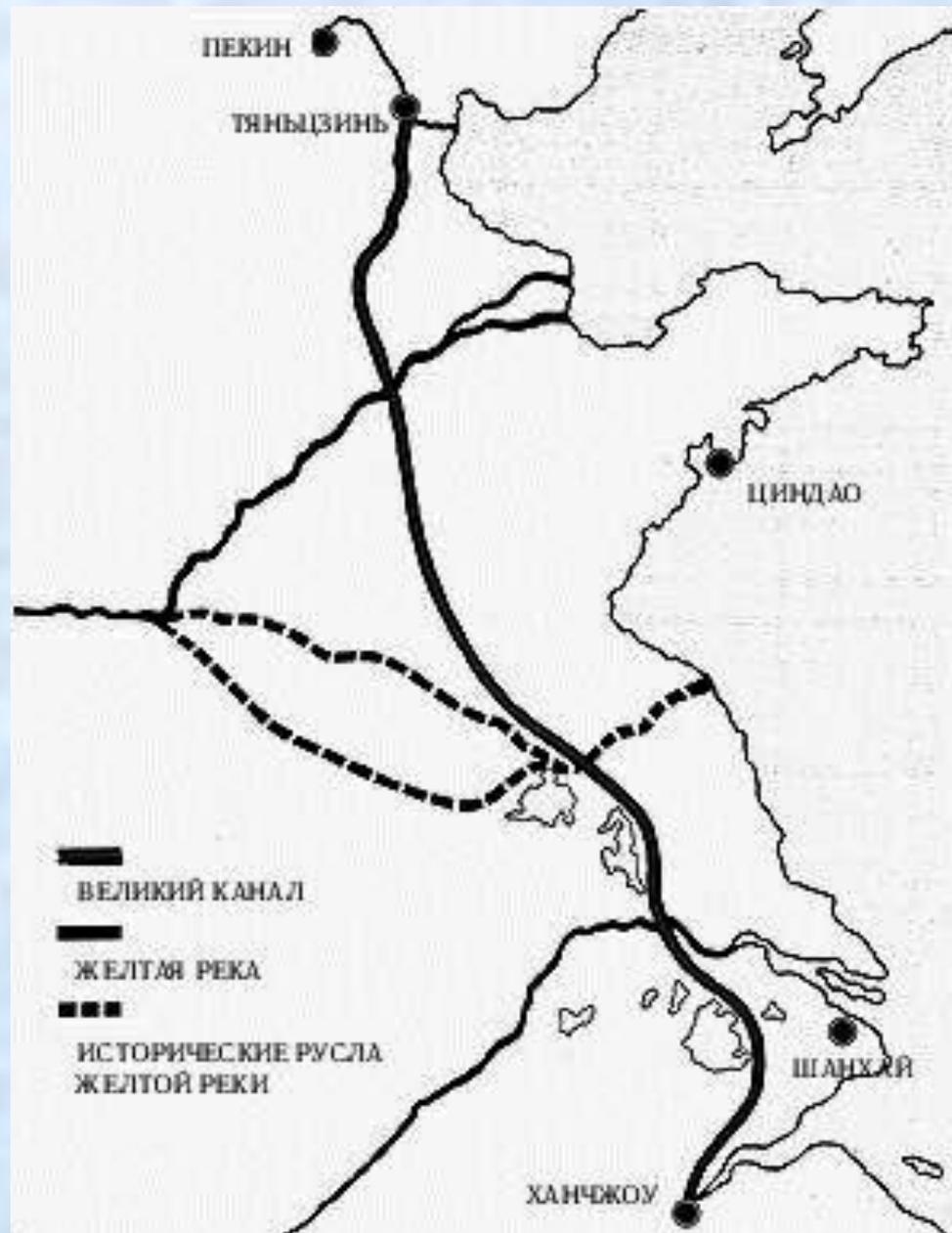


- В 5 в. до н.э. по приказу правителя государства У был построен канал Хань Гоу, проходивший от Гуачжоу (пров. Цзянсу) до Цинцзянши, соединяя реки Янцзы и Хуайхэ. Этот водный путь длиной около 160 км был сделан с целью обеспечения армии продовольствием во время ее продвижения на север, к государствам Сун и Лу. Впоследствии этот канал стал частью знаменитого “Великого канала” (“Да юньхэ”).

- Панорамная карта с изображением Великого Канала. Из трактата 18 в.



- Карта великого канала.

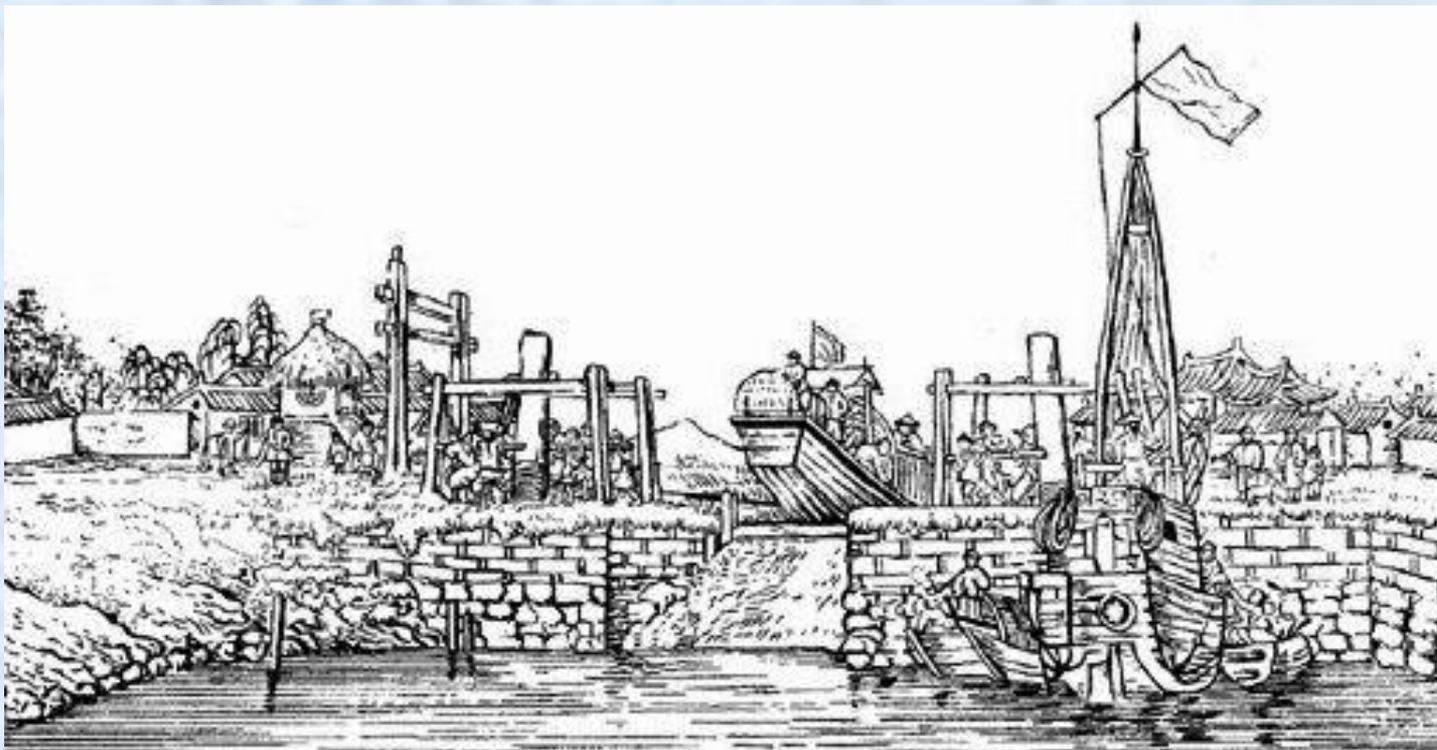


## Великий канал в 20 в.



- Великий канал - самый длинный искусственный водный путь в мире. В целом этот канал, складывающийся из отрезков, построенных в разное время, простирается почти на 1800 км. Он позволил облегчить администрирование страны и связал экономику севера и юга Китая. Глубина Великого канала составляет от 3 до 9 м, а ширина доходит до 30 м.

- Судходный шлюз, в котором осуществлялось попеременное выравнивание уровня воды, был изобретен в Китае в 984 г. Цяо Вэйюэ, который был помощником министра транспорта в Хуайнани.



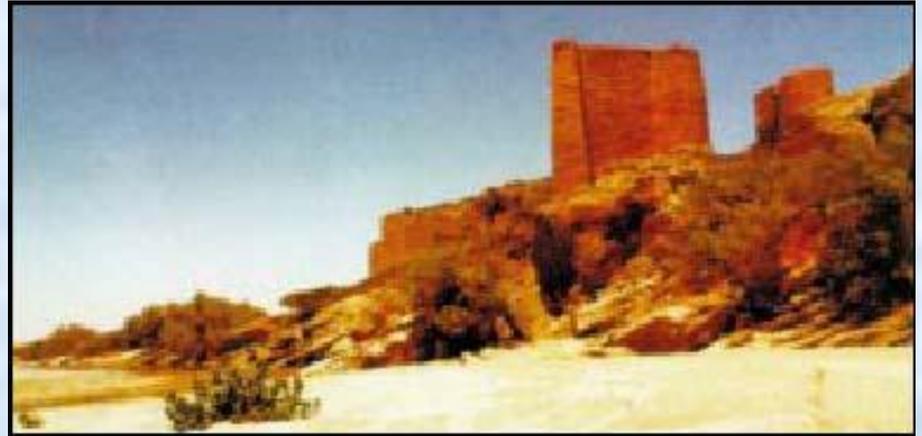
Судопропускное устройство (наклонная плоскость) на великом канале. Со старинной китайской гравюры.



- По легенде, приводимой в древних исторических документах, более 2 тыс. лет до н.э. река Хуанхэ (“Желтая река”) вырвалась из своего русла, что послужило причиной бедственного наводнения. Работы по расчистке русла реки и отвода ее в море возглавил совершенномудрый Юй, основатель легендарной династии Ся. Проходили они 9 лет.

- Позднецинская иллюстрация природоохранной деятельности “Великого гидроинженера” Юя: усиливаются дамбы и удаляются песчаные отмели.

- Период резкого упадка Савской цивилизации, а вслед за этим и развал самого государства Саба начинается вместе с разрушением Марибской плотины.
- Это было сооружение высотой в 16, шириной в 60 и длиной в 620 метров.
- Общая площадь орошаемых посредством плотины земель составляла около 9600 гектаров, 5300 из которых входили в южную долину, а оставшаяся часть приходилась на северную.



Руины Марибской плотины – самого важного достижения сабеян. “Разлив плотины”, упомянутый в Коране, затопил все их посевы. Разоренное Савское государство быстро пришло в упадок и спустя некоторое время окончательно развалилось.



- Первым научным трудом в области гидравлики считается трактат **Архимеда** (287–212 гг. до н.э.) «О плавающих телах».

Основной подъем в развитии гидравлики начался только через 17 веков после Архимеда.

- В XV-XVI вв. **Леонардо да Винчи** (1452–1519) написал работу «О движении и измерении воды», которая была опубликована лишь через 400 с лишним лет после ее создания.
- **С. Стевин** (1548–1620) написал книгу «Начала гидростатики»,
- **Галилео Галилей** (1564–1642) в 1612 г. в трактате «Рассуждение о телах, пребывающих в воде, и о тех, которые в ней движутся» рассмотрел основные законы плавания и гидростатический парадокс,
- **Е. Торричелли** (1608–1647) получил формулу скорости истечения невязкой жидкости из резервуаров через отверстия,
- **Б. Паскаль** (1623–1662) открыл закон о передаче давления в жидкости, прямым следствием чего явилось появление в средние века большого количества простых гидравлических машин (гидравлические прессы, домкраты и т.п.),
- **И. Ньютон** (1643–1727) в 1686 г. сформулировал гипотезу о внутреннем трении в жидкости.

- Перечисленные теоретические работы положили начало бурному развитию гидравлики. Велики заслуги ученых:
- **Д. Полени** (1685–1761), который работал в области истечения через отверстия и водосливы;
- **А. Шези** (1718–1798), изучавшего равномерное движение жидкости;
- **П. Дюбуа** (1734–1809), занимавшегося движением наносов в реках и сопротивлениями движению воды в руслах;
- **Д. Вентури** (1746–1822), исследовавшего истечение через отверстия и насадки;
- **Вейсбаха** (1806–1871), в основном известного работами в области сопротивлений движению жидкости;
- **А. Базена** (1829–1897), изучавшего равномерное движение и истечение жидкости через водосливы;
- **О. Рейнольдса** (1842–1912), внесшего большой вклад в изучение ламинарного и турбулентного режимов движения. Впоследствии это учение, благодаря исследованиям Л. Прандтля и Т. Кармана, завершилось созданием полуэмпирических теорий турбулентности, получивших широкое практическое применение.

- Формирование гидравлики как науки на прочной теоретической основе стало возможным только после работ академиков Петербургской Академии наук, М.В. Ломоносова (1711–1765), Д. Бернулли (1700–1782) и Э. Эйлера (1707–1783).
- **М.В. Ломоносов** в 1760 г, в диссертации «Рассуждение о твердости и жидкости тел» сформулировал открытые им законы сохранения вещества и энергии.
- **Д. Бернулли** в 1738 г. опубликовал выведенное им важнейшее уравнение, названное его именем. Это уравнение служит основой теоретических построений и практических расчетов в области гидравлики.
- **Л. Эйлер** в 1755 г, вывел системы дифференциальных уравнений равновесия и движения жидкости.
- В 1791 г. в Петербурге **А. Колмаков** издал книгу «Карманная книжка для вычисления количества воды, протекающей через трубы, отверстия», которая явилась первым справочником по гидравлике.
- Первое в России учебное пособие по гидравлике под названием «Основания практической гидравлики или о движении воды в различных случаях» было выпущено в 1836 г. П. П. Мельниковым.

- Во второй половине XIX века в России появляются работы, оказавшие большое влияние на последующее развитие гидравлики. И.С. Громека (1851–1889) создал основы теории винтовых потоков и потоков с поперечной циркуляцией.
- В 1880 г. **Д.И. Менделеев** (1834–1907) в своей работе «О сопротивлении жидкости и воздухоплавании» привел важные выводы о наличии двух режимов движения жидкости (ламинарного и турбулентного).
- **Н.П. Петров** (1836–1920) сформулировал закон внутреннего трения в жидкости.
- **Н.Е. Жуковский** (1847–1921) создал теорию гидравлического удара в водопроводных трубах, теорию движения наносов в реках и разработал основополагающие предложения в области фильтрации.
- Труды академика **Н.Н. Павловского** (1884–1937) в области равномерного и неравномерного движения, фильтрации через земляные плотины и под гидротехническими сооружениями явились весьма большим вкладом в развитие гидравлики и послужили основой, наряду с другими работами учеников и последователей Н.Н. Павловского в России, для создания инженерной гидравлики, широко используемой при расчетах в гидротехнике.

# Периодические издания в области гидравлики:



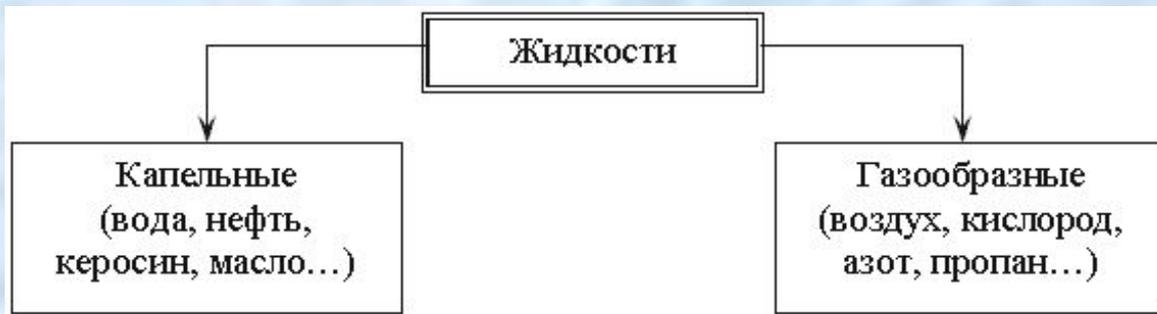
- «Journal of the International Association for Hydraulic Research» (Delft, с 1937).  
«Гидротехническое строительство» (с 1930)
- «Гидротехника и мелиорация» (с 1949),  
«Известия Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева» (с 1931),
- «Труды координационных совещаний по гидротехнике» (с 1961),
- сборники «Гидравлика и гидротехника» (с 1961),
- «Houille Blanche» (Grenoble, с 1946),
- «Journal of the Hydraulics Division. American Society of Civil Engineers» (N. Y., с 1956),
- «L'energia elettrica» (Mil., с 1924).

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА ПО КУРСУ

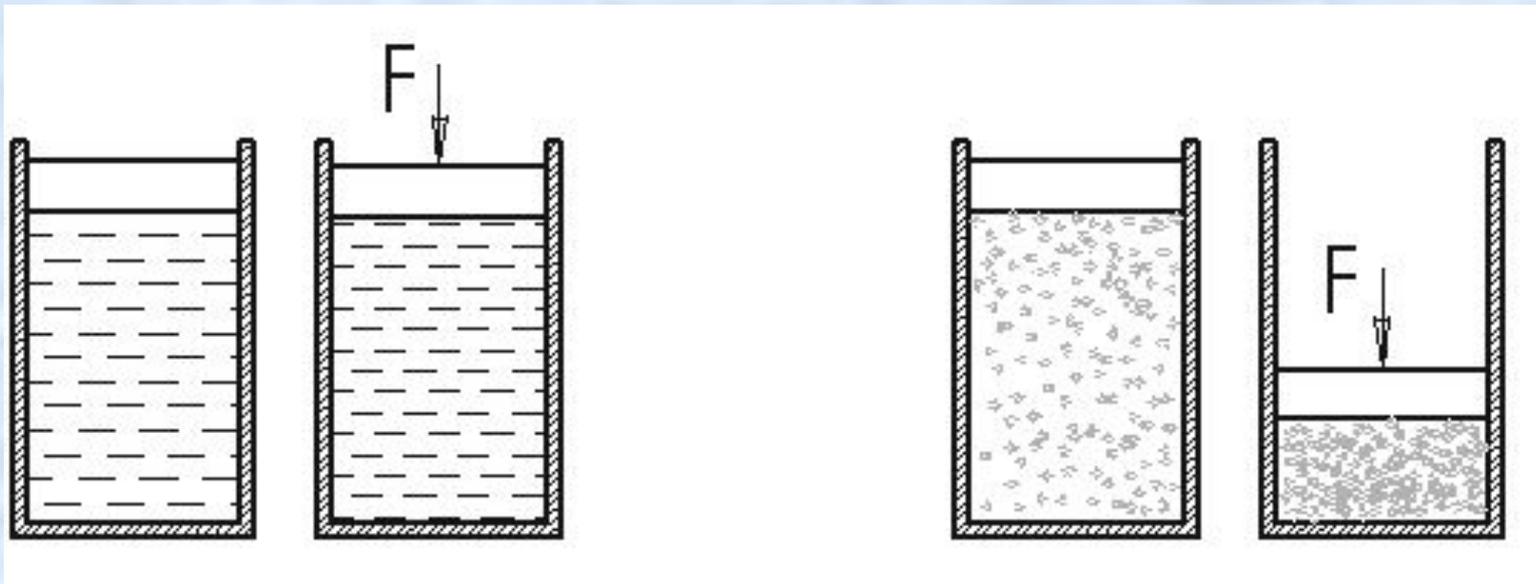
№	Основная
1	Пашков Н.Н., Долгачев Ф.М. Гидравлика. Основы Гидрологии.- М.: Энергоатомиздат, 1993. –448с.: ил.
2	Практикум по гидравлике на портативной лаборатории «Капелька». Методические указания к лабораторным работам / Г.Д. Слабожанин, Д.Г. Слабожанин. -Томск: Изд-во Томск. архит.-строит. ун-та, 2007.-28 с.
3	Штеренлихт. Гидравлика: Учебник для вузов.-М.: Энергоатомиздат, 2004. –640с.
4	Константинов Н.М. и др. Гидравлика, гидрология, гидрометрия: Учеб. Для вузов в 2-х частях. Общие законы. М.: Высш. Шк., 1987.
	Дополнительная
1	Примеры расчетов по гидравлике. Учеб. пособие для вузов. Под. Ред. А.Д. Альштуля. М., Стройиздат, 1976.- 255с.
2	Калицун В.Н. Гидравлика, водоснабжение, канализация. –М.: Стройиздат, 2000. –397с.

# Жидкости и их основные физические свойства

- *Жидкостью* в гидравлике называют физическое тело способное изменять свою форму при воздействии на нее сколь угодно малых сил.
- Различают два вида жидкостей: **капельные и жидкости газообразные**.
- **Капельные жидкости** представляют собой жидкости в обычном, общепринятом понимании этого слова (вода, нефть, керосин, масло и.т.д.).
- **Газообразные жидкости** - газы, в обычных условиях представляют собой газообразные вещества (воздух, кислород, азот, пропан и т.д.).



- Основной отличительной особенностью капельных и газообразных жидкостей является способность сжиматься (изменять объем) под воздействием внешних сил.
- Капельные жидкости (в дальнейшем просто жидкости) трудно поддаются сжатию, а газообразные жидкости (газы) сжимаются довольно легко, т.е. при воздействии небольших усилий способны изменить свой объем в несколько раз (рис.).



- 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. Такие жидкости не существуют в действительности, модель принята для облегчения и упрощения ряда теоретических выводов и исследований.
- *Реальные* – вязкие жидкости, обладающие сжимаемостью, сопротивлением растягивающим и сдвигающим усилиям и достаточной 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, величина которых 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 (или бингамовские).

- **Силы**, действующие в жидкости, принято делить *на внешние и внутренние*.
- **Внутренние силы** представляют собой силы взаимодействия частиц жидкости, они являются парными и их сумма всегда равна нулю.
- Вследствие текучести жидкости в ней не могут действовать сосредоточенные силы, а возможно лишь действие *внешних сил*, непрерывно распределенных по ее объему (массе) или по поверхности.
  
- **Внешние силы** разделяют *на массовые или объемные и поверхностные*.
- **Массовые силы** пропорциональны массе жидкого тела, или, для однородных жидкостей – его объему. **Массовые: силы тяжести и инерции**. Сила тяжести в земных условиях действует на жидкость постоянно, а сила инерции только при сообщении объему жидкости ускорений (положительных или отрицательных), при относительном покое в ускоренно движущихся сосудах или при относительном движении жидкости в руслах, перемещающихся с тем или иным ускорением. К числу массовых сил относят также силы, вводимые при составлении уравнений движения жидкости по принципу Даламбера.
  
- **Поверхностные**: обусловлены воздействием соседних объемов жидкости на данный объем или воздействием других тел.

# Основные физические свойства жидкостей

- **Плотность.** Отношение массы тела  $m$  к его объему  $W$  называется *плотностью жидкости* ( $\rho$ ):

$$\rho = m/W, \text{ кг/м}^3$$

По химическому составу различают однокомпонентные, или чистые жидкости и двух- или многокомпонентные жидкие смеси. Плотность смеси можно рассчитать по формуле:

- $\rho = \frac{(m_1 + m_2)}{(W_1 + W_2)} = \frac{(\rho_1 W_1 + \rho_2 W_2)}{(W_1 + W_2)}$  где  $m_1$  и  $m_2$  — соответственно массы,  $W_1$  и  $W_2$  — объемы и  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — плотности первой и второй жидкости.

- Наибольшая плотность пресных вод будет при температуре  $4^{\circ}\text{C} = 1000 \text{ кг/м}^3$ . Она достигает максимума при температурах  $4,08, 3,8, 3,4^{\circ}\text{C}$  и соответственно давлениях  $0,1, 0,4, 1,0 \text{ МПа}$ .
- Плотность чистой воды при температуре  $15^{\circ}\text{C}$  и атмосферном давлении составляет  $999 \text{ кг/м}^3$ .
- Морская вода с концентрацией солей  $35 \text{ г/л}$  имеет среднюю плотность  $1028,1 \text{ кг/м}^3$  при  $0^{\circ}\text{C}$ . Изменение солесодержания на  $1 \text{ г/л}$  изменяет плотность на  $0,8 \text{ кг/м}^3$ .
- Средняя плотность Мирового океана составляет  $1025 \text{ кг/м}^3$ . Плотность воды увеличивается от поверхности Океана от  $1022 \text{ кг/м}^3$  ко дну и притом вначале быстро до  $1027 \text{ кг/м}^3$  на глубине около  $1500 \text{ м}$ , а затем медленно до  $1028 \text{ кг/м}^3$ .

- *Удельным весом жидкости* ( $\gamma$ ) называется отношение веса жидкости к ее объему:

- $$\gamma = \frac{G}{W} = \rho g \quad , \quad \text{Н/м}^3.$$

- Если взять уравнение, выражающее второй закон Ньютона  $G=mg$ , разделить обе его части на объем  $W$ , то получится связь между плотностью и удельным весом:

- $$\frac{G}{W} = \frac{mg}{W}$$

где  $G$  – сила тяжести,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

- Удельный вес пресной воды при  $t = 4 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $\gamma=981 \text{ Н/м}^3$ , в табл. приведен удельный вес и плотность некоторых жидкостей при температуре  $20^\circ \text{C}$  температура.

Жидкость	Удельный вес $\gamma$ , $\text{Н/м}^3$	Плотность $\rho$ , $\text{кг/м}^3$
Ртуть	132900	13547
Вода: морская пресная	10010–10090 9790	1002–1029 998,2
Масло минеральное	8600–8750	877–892
Нефть	8340–9320	850–950
Керосин	7770–8450	792–840
Спирт этиловый	7740	789,3
Бензин	7250–7370	739–751

- **Сжимаемость.** При сжатии реальные жидкости незначительно уменьшаются в объеме. Свойство жидкостей изменять объем при изменении давления характеризуется *коэффициентом объемного сжатия* ( $\beta_w$ ), представляющим собой относительное изменение объема жидкости при изменении давления на единицу:

$$\beta_w = \frac{\Delta W}{W \Delta p} = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta p}, \text{ Па}^{-1},$$

где  $\Delta W$  – изменение объема,  $\Delta \rho$  – изменение плотности, соответствующие изменению давления на величину  $\Delta p$ .

- Значения коэффициента объемного сжатия воды в зависимости от температуры и давления приведены в табл. Коэффициент объемного сжатия для других капельных жидкостей такого же порядка, поэтому в большинстве случаев сжимаемостью капельных жидкостей можно пренебречь.

Температура, °С	Коэффициенты объемного сжатия $\beta_w$ при давлении, Па*10 <sup>-4</sup>				
	50	100	200	300	780
0	5,4	5,37	5,31	5,23	5,15
5	5,29	5,23	5,18	5,08	4,93
10	5,23	5,18	5,08	4,98	4,81
15	5,18	5,1	5,03	4,88	4,7
20	5,15	5,05	4,95	4,81	4,6

- Величина, обратная коэффициенту объемного сжатия, представляет собой *объемный модуль упругости жидкости* ( $E_{ж}$ ):
- $E_{ж} = \frac{1}{\beta_w} = \rho * \frac{\Delta p}{\Delta \rho}$  , Па.
- Для воды при атмосферном давлении  $E_{ж}$  составляет около 2000 МПа.

- **Температурное расширение.** Это свойство жидкостей изменять свой объем характеризуется *коэффициентом температурного расширения* ( $\beta_t$ ) представляющим собой относительное изменение объема жидкости  $W$  при изменении температуры  $t$  на  $1^\circ\text{C}$  и постоянном давлении:

$$\beta_t = \frac{\Delta W}{W(\Delta t)} \quad ^\circ\text{C}^{-1}.$$

0,000621

- Коэффициенты температурного расширения  $\beta_t$  воды приведены в табл..

Давление $P$ , Па* $10^5$	Коэффициенты температурного расширения $\beta_t$ при температуре $1/^\circ\text{C}$				
	1-10	10-20	40-50	60-70	90-100
1	0,000014	0,000150	0,000422	0,000556	0,000719
100	0,000043	0,000165	0,000422	0,000548	0,000704
200	0,000072	0,000183	0,000426	0,000539	0,000682
500	0,000149	0,000236	0,000429	0,000523	0,000661
900	0,000229	0,000289	0,000437	0,000514	0,000621

- Зная коэффициент температурного расширения  $\beta_t$  и плотность жидкости ( $\rho$ ) при определенной температуре ( $t$ ) можно определить плотность жидкости ( $\rho_i$ ) при другой температуре – ( $t_i$ ):

$$\rho_i = \frac{\rho}{(1 + \beta_t (t_i - t))}$$

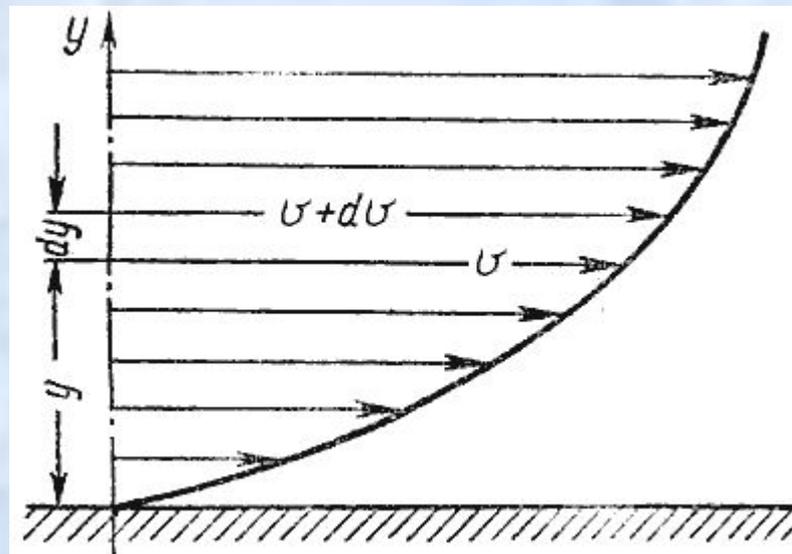
- ***Вязкость***, внутреннее трение, свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой.

- Основной закон вязкого течения был установлен
- И. Ньютоном:

$$\tau = \pm \mu \frac{dv}{dy}$$

- где  $\tau$  – касательные напряжения жидкости  $\tau = T/w$ ,
- $T$  – тангенциальная (касательная) сила, вызывающая сдвиг слоёв жидкости (газа) относительно друг друга,
- $w$  – площадь слоя, по которому происходит сдвиг;

$$\frac{dv}{dy} = \frac{(v_2 - v_1)}{(y_2 - y_1)} \quad \text{– градиент скорости течения (быстрота её изменения от слоя к слою), иначе – скорость сдвига}$$



Коэффициент пропорциональности называется **коэффициентом динамической вязкости ( $\mu$ )**. Он количественно характеризует сопротивление жидкости (газа) смещению её слоёв.

**Знак «плюс» или «минус» в формулах принимается в зависимости от знака градиента скорости.**

- Вязкость численно равна тангенциальной силе на единицу площади ( $T/w$ ), необходимой для поддержания разности скоростей, равной единице, между двумя параллельными слоями жидкости (газа), расстояние между которыми равно единице. Из этого определения следует, что вязкость имеет размер  $\text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2$ . Иногда вязкость измеряют в пуазах,  $1\text{Пз} = 0,1 \text{Н}\cdot\text{с}/\text{м}^2 = 0,1\text{Па}\cdot\text{с}$ .
- Величина обратная  $\mu$ , называется *текучестью*  

$$j = \frac{1}{\mu}$$
- Наряду с динамической вязкостью ( $\mu$ ) часто рассматривают *кинематическую вязкость* ( $\nu$ ):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho},$$

- где  $\rho$  плотность жидкости или газа.
- Единицами кинематической вязкости служат  $\text{м}^2/\text{с}$  и  $\text{см}^2/\text{с}$ , ранее использовались стоксы,  $1\text{Стокс} = 1 \cdot 10^{-4} \text{м}^2/\text{с}$ .

## Кинематическая вязкость некоторых жидкостей ( $\nu$ ):

Жидкость	$\nu * 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	Жидкость	$\nu * 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$
Анилин	4,3	Масло касторовое	1002
Бензин	0,83-0,93	льняное	55
Вода пресная	1,01	минеральное	313-1450
Глицерин безводный	4,1	Нефть	8,1-9,3
Дизельное топливо	5	Ртуть	0,11
Керосин	2-3	Спирт этиловый безводный	1,51
Красочные растворы (готовые к употреблению)	90-120	Хлористый натрий (26%-ный раствор)	1,53

- Вязкость жидкостей измеряют с помощью приборов-вискозиметров (от позднелатинского **viscosus** – вязкий и метр). Наиболее распространены вискозиметры капиллярные, ротационные, с падающим шариком, ультразвуковые.
- В простом *полевом вискозиметре*, основанном на принципе истечения, в воронку наливается, например, глинистый раствор объемом 500 см<sup>3</sup>, вязкость которого следует установить. Измеряются температура и время истечения из воронки исследуемого раствора  $t_p$ ; затем наливается в воронку дистиллированная вода при такой же температуре (обычно 20°C) и определяется время ее истечения  $t_v$ .
- Отношение  $t_p / t_v$  и есть относительная вязкость (для глинистых растворов она всегда больше 1).

- Для нефтепродуктов применяются вискозиметры типа ВУ (Энглера) и вязкость приводится в градусах ВУ (Энглера – °E). Вязкостью, выраженной в градусах Энглера, называется отношение времени истечения 200 см<sup>3</sup> испытуемой жидкости через капилляр  $d = 2,8$  мм к времени истечения такого же объема воды при  $t = 20^{\circ} \text{C}$

$$1^{\circ} E = \frac{t}{t_{\text{воды}}}, \text{ где, } t_{\text{воды}} = 51,6 \text{ сек.}$$

- Перевод условных единиц в единицы кинематической вязкости возможен по формуле Убеллоде:

$$\nu = \left( 0,0731 E - \frac{0,0613}{E} \right) * 10^{-4}, \text{ м}^2/\text{с.}$$

Оценка вязкости

```
graph TD; A[Оценка вязкости] --> B[Динамический коэффициент μ, Н·с/м²]; A --> C[Кинематический коэффициент ν = μ/ρ, м²/с]; A --> D[Градусы Энглера °Е];
```

Динамический  
коэффициент  
 $\mu$ , Н·с/м<sup>2</sup>

Кинематический  
коэффициент  
 $\nu = \mu/\rho$ , м<sup>2</sup>/с

Градусы Энглера  
°Е

- Для *неньютоновских (бингемовских) жидкостей* соотношение между касательными напряжениями  $\tau$  и градиентом скорости описывается формулой Шведова-Бингема:

$$\tau = \tau_0 \pm \mu \frac{dv}{dy},$$

- где  $\tau_0$  – касательное напряжение в состоянии покоя или начальное напряжение сдвига,  $\mu$ , – коэффициент структурной вязкости.

## Касательное напряжение и коэффициенты структурной вязкости некоторых растворов

Виды растворов	$\mu$ , Па·с	$\tau_0$ , Н/м <sup>2</sup>
Цементный (тесто)	0,3	130-145
Известковый (тесто)	0,36-0,4	170-220
Глиняный (тесто)	0,5-0,55	330-400
Цементно-песчаный:		
1:1	0,32 0,21-0,22	150 50-70
1:3		
Известково-песчаный 1:2	0,28-0,33	100-120
Смешанный:		
1:1:6	0,24-0,26 0,32	75-100 150
1:1:2		
Глинистая гидросмесь, $\rho = 1085 \text{ кг/м}^3$	0,005-0,035	10-50
Меловая гидросмесь влажностью 36-41%	0,6-3,1	20
Глинисто-меловая смесь:		
1:3	9-17	25
1:4	20-25	25-40
Промывочная жидкость при бурении (частиц более 10 мм -15%, меньше 1 мм до 50%)	3,5-5	10
Вводно-угольная смесь класса 0-0,5 мм (менее 0,04 мм – 65%) с $s=0,32$	0,088	13,5
Содовая суспензия с $s=0,32$	0,12	14,5
Кормовая смесь (комбикорма 60%, сахарная свекла 40%), $\rho =$ $1050 \text{ кг/м}^3$	0,66	7

- Вязкость жидкостей зависит от температуры. Энергия активации уменьшается с ростом температуры и понижением давления. В этом состоит одна из причин резкого снижения вязкости жидкостей с повышением температуры и роста её при высоких давлениях. При повышении давления до нескольких тыс. атмосфер  $\mu$  увеличивается в десятки и сотни раз.
- Для чистой воды зависимость вязкости от температуры может быть выражена формулой Пуазейля:

$$\nu = \frac{0,0178}{1 + 0,0337t + 0,000221t^2} 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$$

- где  $t$  – температура.

- **Поверхностное натяжение** (капиллярность) – свойство, обусловленное силами взаимного притяжения, возникающими между частицами (молекулами) жидкости. Силы поверхностного натяжения развивают молекулярное давление в жидкости, нормальное к ее поверхности.
- **Высота капиллярного поднятия** (при смачивании) или опускание (если нет смачивания) жидкости на высоту, определяется

$$h = \frac{4\sigma \cos \vartheta}{(\rho g d)},$$

- где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $d$  – диаметр капилляра, м;  $\vartheta$  – угол между касательной к свободной поверхности в точке пересечения со стенкой и самой стенкой капилляра (для воды и стекла  $\vartheta = 0^\circ$  для ртути и стекла  $\vartheta = 50^\circ$ ).
- При температуре  $20^\circ\text{C}$  в трубке диаметром  $d$  высота капиллярного поднятия для воды, спирта и ртути соответственно равна  $30/d$ ,  $10/d$  и  $10,15/d$  мм.
- Коэффициенты поверхностного натяжения  $\sigma$  (Н/м) некоторых жидкостей при температуре  $20^\circ\text{C}$  приведены в табл..

Жидкость	$\sigma$ – коэффициент поверхностного натяжения	Жидкость	$\sigma$ – коэффициент поверхностного натяжения
Вода	0,073	Масла и нефть	0,025-0,031
Бензол	0,029	Ртуть	0,49
Глицерин	0,065	Спирт	0,0225
Мыльная вода	0,04	Аммиак	0,042

Воды не оказывают влияния на увлажнение промерзающего грунта, если расстояние от границы промерзания  $d_{fn}$  до уровня подземных вод, больше значения наименьшего расстояния,  $z$ , м, которое определяется по табл.

Наименование грунта	Значение $z$ , м
Глина с монтмориллонитовой и иллитовой основой	3,5
Глины с каолинитовой основой	2,5
Суглинки пылеватые с $I_p > 0,13$	2,5
Суглинки с $I_p > 0,13$	2,0
Суглинки пылеватые с $I_p \leq 0,13$	2,0
Суглинки с $I_p \leq 0,13$	1,8
Супеси пылеватые с $I_p \geq 0,2$	1,5
Супеси с $I_p > 0,02$	1,3
Супеси с $I_p \leq 0,02$	1,0
Пески пылеватые	1,0
Пески мелкие	0,8

- Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры может быть представлена в следующем виде:

$$\sigma = \sigma_0 - \beta t,$$

- где  $\sigma_0$  – коэффициент поверхностного натяжения при соприкосновении с воздухом при  $t=0^\circ\text{C}$ .
- Для воды  $\sigma_0 = 0,076 \text{ Н/м}$ ,  $\beta = 0,00015 \text{ Н}/(\text{м}^\circ\text{C})$ .

- **Скорость накипеобразования** ( $w$ ), г  $\text{CaCO}_3/(\text{м}^2\text{ч})$ , в охлаждающей системе обратного водоснабжения в значительной степени зависит от режима движения воды, который определяет диффузию ионов к поверхности теплообменника:  $\square$
- $w = 0,054Re^{0,68}$ ,
- где  $Re$  – число Рейнольдса.
- Зависимость скорости накипеобразования ( $w$ , г  $\text{CaCO}_3/(\text{м}^2\text{ч})$ ), от температуры теплопередающей поверхности при  $t = 64...84$  °С примерно линейна и определяется по формуле:
- $w = 0,9t - 12,6$ .

- **Удельная теплоемкость воды** составляет 4180 Дж/кг<sup>°C</sup>) при 0<sup>°C</sup>. Она изменяется в зависимости от температуры и достигает минимума при +35<sup>°C</sup>.
- **Удельная теплота плавления** при переходе льда в жидкое состояние составляет 330 кДж/кг, удельная теплота парообразования – 2250 кДж/кг при нормальном давлении и температуре 100<sup>°C</sup>.
- Вследствие значительных величин теплоемкости и скрытой теплоты трансформации воды огромные ее объемы на поверхности Земли представляют собой аккумуляторы тепла. Эти же свойства воды обуславливают ее использование в промышленности в качестве теплоносителя. Тепловые характеристики воды являются одними из важнейших факторов термической стабильности биосферы.

- **Электропроводность.** Химически чистая вода почти не проводит электрического тока.
- Ее удельная *электропроводность* при 18°C равна  $4,3 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ .
- Удельное сопротивление сточных вод после аэротенков перед доочисткой составляет 8000, после нее – 10000, у осадка – 6000 Ом\*см.