



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ДГТУ)

Кафедра «Гидравлика, гидропневмоавтоматика и тепловые процессы»

***Лабораторная (практическая) работа №3В***

по дисциплине «Экспериментальная гидромеханика судна»

**«ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПЫТНЫМ ПУТЕМ СЛАГАЕМЫХ УРАВНЕНИЯ  
Д. БЕРНУЛЛИ ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ НЕРАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ  
ЖИДКОСТИ»**

Выполнил(а) студент(ка) группы \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Проверил: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Отметка о выполнении практической части работы	Отметка о защите

Ростов-на-Дону, 20\_\_

### Лабораторная работа 3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПЫТНЫМ ПУТЕМ СЛАГАЕМЫХ УРАВНЕНИЯ Д. БЕРНУЛЛИ ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ НЕРАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ

### 1. Теоретическая часть.

Уравнение Бернулли имеет широкое применение во многих гидравлических расчетах и для объяснения многих гидравлических явлений. В частности, оно используется при измерении давления и скорости движущейся жидкости в гидромеханике и изменения энергии потока.

Для двух произвольно выбранных живых сечений I-I и II-II (рис.1) струйки реальной жидкости при установившемся движении уравнение Д. Бернулли имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{U_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}}. \quad (1)$$

Слагаемые, входящие в уравнение (1), можно истолковать с геометрической и энергетической точек зрения.

С геометрической точки зрения слагаемые уравнения (1) являются высотами (напорами) :

$z$  – геометрическая высота (напор), т.е. превышение центра тяжести рассматриваемого поперечного сечения струйки над плоскостью сравнения 0-0, выбираемой произвольно;

$\frac{p}{\rho g}$  – пьезометрическая высота, т.е. высота подъема жидкости в пьезометре, подключенном к центру тяжести рассматриваемого сечения струйки, отвечающая гидродинамическому давлению  $p$  в этой точке;

$\frac{U^2}{2g}$  – скоростная высота (напор), отвечающая местной скорости  $U$ , т.е. скорости в центре тяжести сечения;  $z + \frac{p}{\rho g}$  – гидростатический напор;

$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} = H$  – полный напор в рассматриваемом сечении струйки;

$h_{w_{1-2}} = H_1 - H_2$  – потеря полного напора, т.е. часть полного напора, затраченная на преодоление гидравлических сопротивлений на пути между сечениями I-I и II-II.

С энергетической точки зрения слагаемые уравнения (1) представляют собой разновидности удельной энергии, а именно:

$z$  – удельная потенциальная энергия положения жидкости в рассматриваемом сечении струйки;

$\frac{p}{\rho g}$  – удельная потенциальная энергия давления;

$\frac{U^2}{2g}$  – удельная кинетическая энергия;

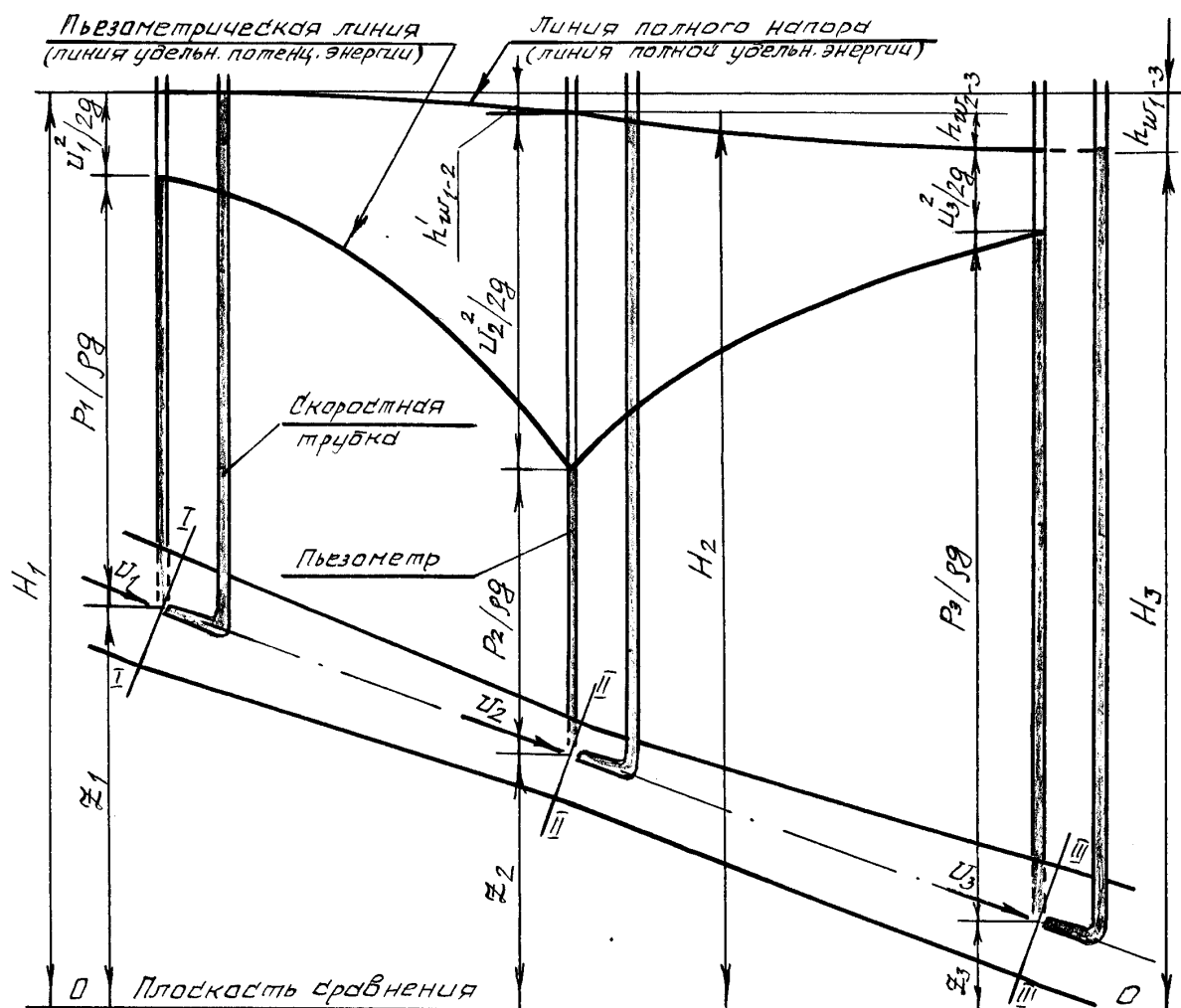
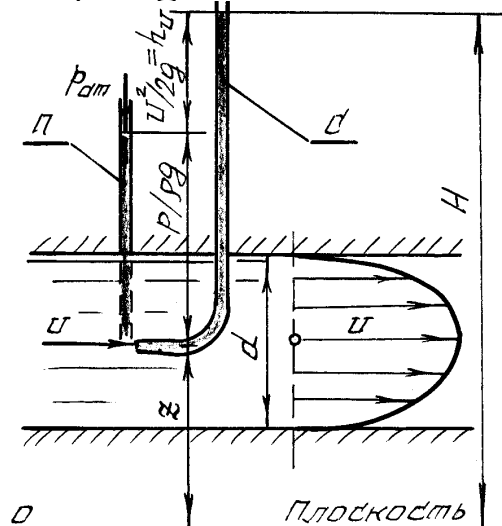


Рис.1. Диаграмма уравнения Д.Бернулли для струйной трубки жидкости

а) напорное движение



б) безнапорное движение жидкости

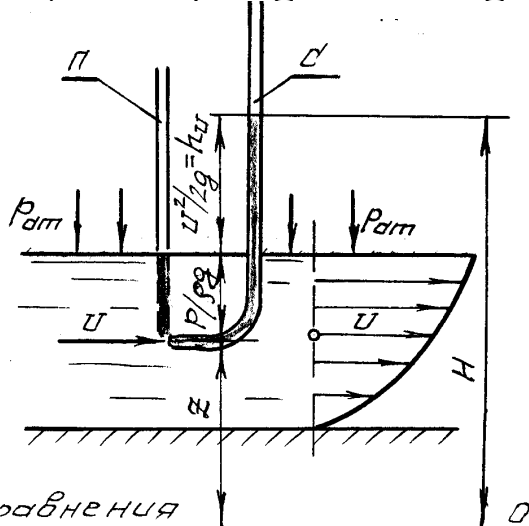


Рис.2. К измерению скоростного напора  $U^2/2g$  при напорном и безнапорном движении жидкости

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g} - \text{полная удельная энергия;}$$

$$z + \frac{p}{\rho g} - \text{удельная потенциальная энергия;}$$

$h_{w_{1-2}}$  - потеря полной удельной энергии струйки, т.е. часть ее, затраченная на преодоление работы сил внутреннего трения, обусловленного вязкостью жидкости.

Удельной энергией называется энергия, приходящаяся на единицу веса жидкости.

Величины слагаемых уравнения (1) могут быть определены опытным путем следующим образом:

$z$  – геометрическим нивелированием или измерением линейкой;

$\frac{p}{\rho g}$  – с помощью пьезометрической трубки (пьезометра);

$\frac{U^2}{2g}$  – по разности отметок уровней жидкости в скоростной и пьезометрической трубках, подключенных к рассматриваемой точке живого сечения струйки;

$h_{w_{1-2}}$  - по разности отметок уровней воды в скоростных трубках, подключенных к сечениям I-I и II-II струйки реальной жидкости.

Скоростная трубка представляет собой трубку, верхний конец которой открыт в атмосферу, а нижний изогнут навстречу скорости  $U$  в рассматриваемой точке потока жидкости (рис.2). Благодаря этому у входа в изогнутый конец скоростной трубки кинетическая энергия частицы жидкости преобразуется в потенциальную энергию давления столба жидкости высотой  $h_U = \frac{U^2}{2g}$ .

Поскольку срез нижнего конца скоростной трубки перпендикулярен вектору скорости, а срез нижнего конца пьезометра параллелен, уровень жидкости в скоростной трубке всегда устанавливается выше, чем в пьезометре, на величину  $\frac{U^2}{2g}$ .

Прибор, объединяющий конструктивно пьезометрическую (П) и скоростную (С) трубки, называется трубкой Пито и широко применяется для измерения скорости движения жидкости  $U = \sqrt{2gh_U}$ .

Для двух сечений потока реальной жидкости уравнение Д. Бернулли имеет вид:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} + h_{w_{1-2}}, \quad (2)$$

где  $\frac{\alpha U^2}{2g}$  - скоростной напор, отвечающий средней скорости

$U = \frac{Q}{\omega}$  потока жидкости в рассматриваемом живом сечении (здесь  $Q$  - расход потока жидкости,  $\omega$  - площадь живого сечения потока);

$h_{w_{1-2}}$  - потеря полного напора (полной удельной энергии) на преодоление работы сил внутреннего и внешнего трения на пути между живыми сечениями потока жидкости I-I и II-II;

$\alpha$  - коэффициент Кориолиса (корректив кинетической энергии), учитывающий неравномерность распределения местных скоростей  $U$  по живому сечению потока, обусловленную вязкостью жидкости.

Величина  $\alpha$  зависит от режима течения жидкости, а также от вида движения. Так, при равномерном движении для ламинарного режима  $\alpha=2,0$ , а для турбулентного -  $\alpha=1,05 \dots 1,15$ .

Слагаемые уравнений (1) и (2) в различных живых сечениях можно изображать графически в виде диаграммы уравнения Д. Бернулли, дающей наглядное представление о перераспределении по пути движения жидкости потенциальной и кинетической энергии, а также о характере убывания полной энергии.

**Уравнение Бернулли**, используется при расчетах взаимодействия судов с различными морскими гидросооружениями, такими как каналы, узкости, шлюзы и т. д., созданные как самой природой, так и человеком. При расчете и проектировании морских каналов учитывают эффект присасывания днищевого корпуса судна ко дну канала, для этого берется запас под килем равный порядка 30 % от потенциально-разрешенной осадки судна, так же ограничивается скорость движения по каналу в зависимости от размера судна и характеристик природного или созданного человеком материала.

Теоретически такой запас называется «Суммарный навигационный запас глубины» [РД31.31.47–88] и рассчитывается по формуле:

$$\sum Z_{0-3} = Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_0, \quad (3)$$

где  $Z_1$  — минимальный навигационный запас, необходимый для обеспечения управляемости судна, м;

$Z_2$  — волновой запас на погружение оконечности судна при волнении, м;

$Z_3$  — запас на изменение осадки судна на ходу на тихой воде по сравнению с осадкой без хода, м;

$Z_0$  — запас на крен судна, возникающий от воздействия расчетного ветра и гидродинамических сил на повороте, м.

Чем меньше пространства под днищем для прохода воды, тем выше скорость воды и больше падение давления под корпусом, а соответственно сильнее проседание судна. При движении судна на мелководье с ограниченной акваторией на поле вызванных скоростей оказывают влияние не только дно, но и стенки канала. В результате этого воздействия перепады поля давлений вокруг судна имеют большую амплитуду, чем в условиях неограниченной акватории.

Дополнительное падение давления приводит к дополнительному проседанию. Это же явление наблюдается не только при движении по каналам, но и на открытой воде в условиях мелководья. При движении судна по мелководью ситуация складывается аналогично (рис.3).

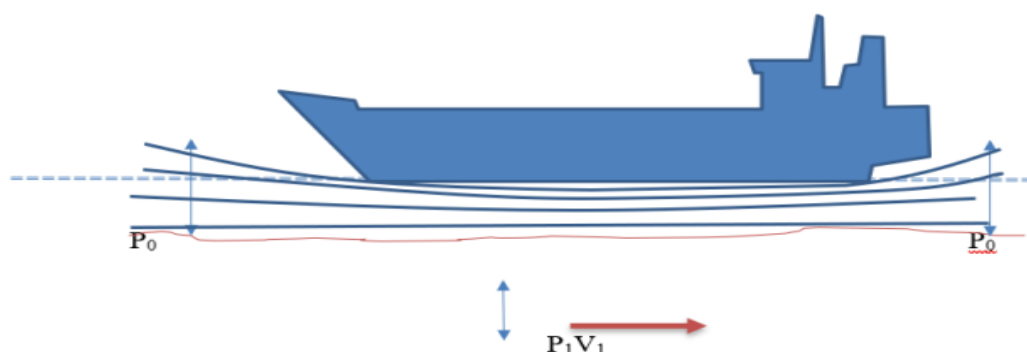


Рис.3. Схема судна при движении по мелководью

Вода под днищем судна оказывается сужена, скорость потока увеличивается, давление под судном уменьшается — судно «притягивается» ко дну. Во избежание касания дна, необходимо сбросить скорость хода, чтобы минимизировать этот эффект.

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработано большое количество методов и эмпирических зависимостей для определения просадки судна в различных условиях плавания и конструктивных особенностей судов.

Наиболее общее решение имеет «классический метод», основанный на непосредственном применении закона Бернулли и закона неразрывности потока жидкости. Модифицируя уравнение Бернулли и принимая во внимание, что величину давления  $p$  можно выразить высотой водяного столба над условным уровнем  $H$ , уравнение примет вид:

$$H + \frac{U^2}{2g} = \text{const}, \quad (4)$$

где  $H$  — глубина, м;  
 $U$  — скорость потока жидкости, омывающего судно (скорость встречного потока), м/с;  
 $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Кроме того, следует учитывать воздействие гидродинамических сил и моментов сил на суда в процессе их маневрирования, которые изменяются по характеру и интенсивности в зависимости от положения одного судна относительно другого и относительно берега. Поскольку эти силы про-

являются тем слабее, чем меньше скорость судов, одним из основных требований для безопасности расхождения является заблаговременное снижение скорости судов, которое следует начинать, учитывая инерционные характеристики судна и влияние узкости на маневренные характеристики.

**2.Описание установки.** Установка представляет собой трубопровод переменного сечения с напорным баком, вода в который подается по питающему трубопроводу открытием вентиля. Напорный бак снабжен переливным устройством для поддержания уровня воды на постоянной отметке, чтобы обеспечить в трубопроводе переменного сечения установившееся движение жидкости (рис.4).

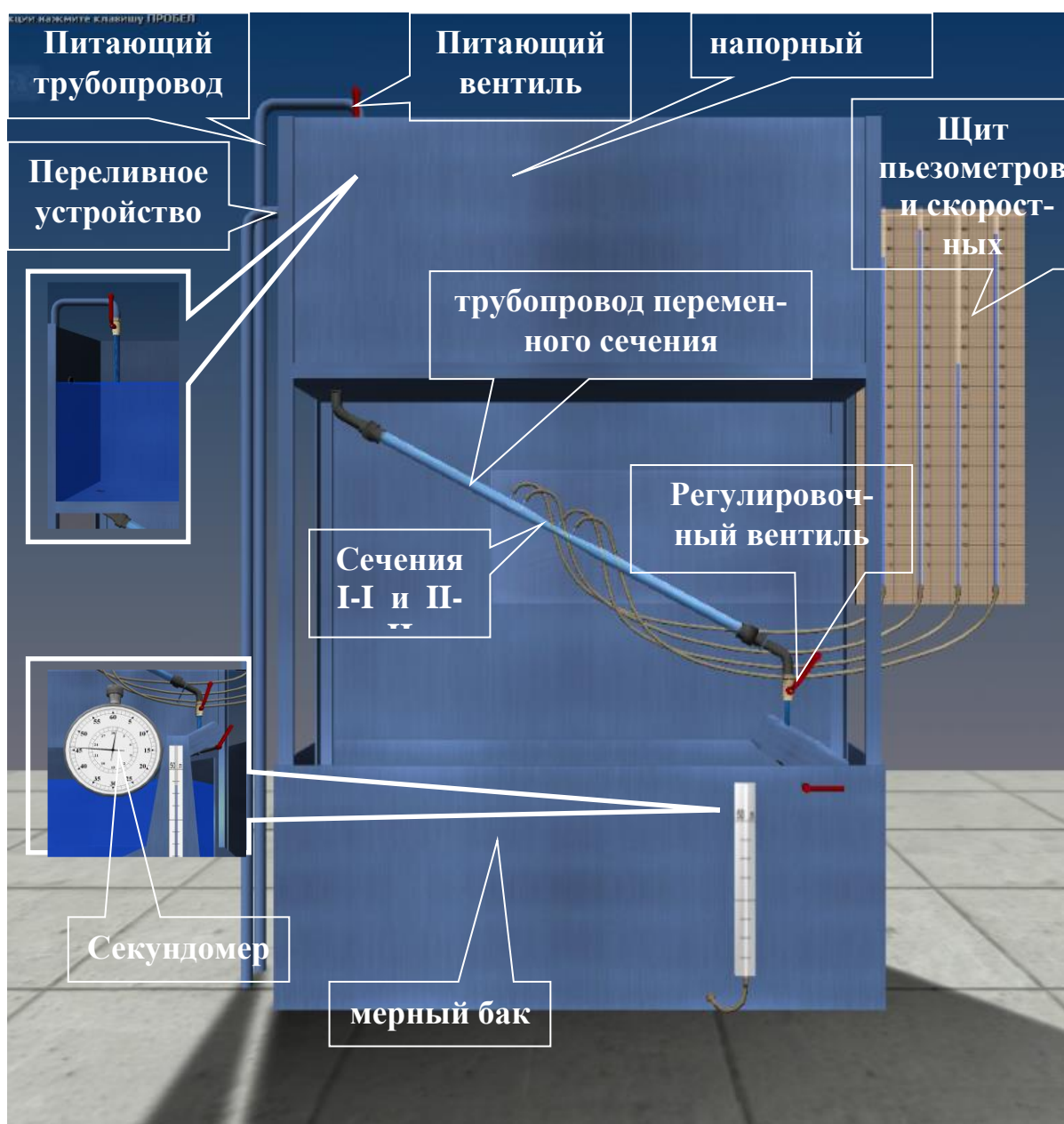


Рис.4 Схема установки для экспериментальной иллюстрации слагаемых уравнения Д. Бернулли

К сечениям I-I...II-II трубопровода переменного сечения подключены пьезометры и скоростные трубки для измерения величин  $z + \frac{p}{\rho g} - u - z + \frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g}$ . Величина расхода воды в трубопроводе переменного сечения регулируется вентилем. Для измерения расхода воды имеются мерный бак и секундомер.

### 3. Теоретическая часть.

1. Определить опытным путем слагаемые  $z, \frac{p}{\rho g}, \frac{U^2}{2g}$  уравнения Д. Бернулли для сечений I-I...II-II, а также потери полного напора  $h_{w_{1-2}}$  между сечениями.
2. Вычислить средние скорости потока  $U$  и отвечающие им скоростные напоры  $\frac{U^2}{2g}$  для указанных живых сечений потока жидкости.
3. Построить в масштабе по опытным данным пьезометрическую линию и линию полного напора.

### 4. Порядок выполнения работы.

1. При закрытом регулирующем вентиле открыть питающий вентиль для заполнения напорного бака и трубопровода переменного сечения водой. При этом следует обратить внимание на уровни воды в пьезометрических и скоростных трубках. Эти уровни при отсутствии воздуха в системе должны быть на одной отметке.
2. Открыть регулирующий вентиль так, чтобы трубопровод переменного сечения работал полным сечением, а уровень воды в напорном баке был постоянным.
3. Измерить с помощью мерного бака  $\delta$  и секундомера расход воды. Затем измерить геометрические высоты  $z$  центров тяжести сечений I-I...II-II относительно плоскости сравнения 0-0, отмеченной на установке.
4. Определить по шкалам отметки уровней воды в пьезометрах и скоростных трубках в сечениях I-I...II-II. Результаты всех измерений записать в таблицу. Затем выполнить все вычисления, предусмотренные таблицей, и построить в масштабе по полученным данным линии полного напора и пьезометрическую.
5. Дать заключение по результатам работы.



Таблица 3. Результаты обработки экспериментальных данных

№ поз	Наименования и обозначения измеряемых и вычисляемых величин	Ед. изм.	Результаты измерений и вычислений		
			I-I	II-II	III-III
1	2	3	4	5	6
1	Геометрические высоты центров тяжести сечений $z$	м			
2	Отметки уровней воды в пьезометрах, т.е. гидростатические напоры $\left(z + \frac{p}{\rho g}\right)$	м			
3	Отметки уровней воды в скоростных трубках, т.е. полные напоры $H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{U^2}{2g}$	м			
4	Пьезометрические высоты $\left(z + \frac{p}{\rho g}\right) - z$	м			
5	Скоростные высоты $\frac{U^2}{2g} = H - \left(z + \frac{p}{\rho g}\right)$	м			
6	Потери полного напора на пути между соседними живыми сечениями струйками $h_{w_{I-(i+1)}} = H_i - H_{i+1}$	м			
7	Суммарные потери полного напора $h_{w_{I-III}} = H_I - H_{III}$	м			
8	Объем воды в мерном баке $W$	м <sup>3</sup>			
9	Продолжительность наполнения объема $W$ в мерном баке $t$	с			
10	Расход воды в трубопроводе $Q = W/t$	м <sup>3</sup> /с			
11	Диаметр сечения $d$	м			
12	Площадь сечения $\omega$	м <sup>2</sup>			
13	Средняя скорость движения воды $g = Q/\omega$	м/с			
14	Скоростная высота, отвечающая средней скорости, $\frac{g^2}{2g}$	м			
15	Разность скоростных высот $\left(\frac{U^2}{2g} - \frac{g^2}{2g}\right)$	м			

**Примечание к табл. 3**

1. Для сечения III-III (см графу 6) числовые значения величин (см. позиции 5 и 11...15) те же, что и для сечения I-I.
2. Потери полного напора  $h_{w_{I-2}}$  (см. позицию 6) между сечениями II-II и III-III принять равными потерям напора между сечениями I-I и II-II
3. Остальные величины для сеч. III-III (см. позиции 1...4) следует определить с привлечением уравнения Д. Бернулли (см. уравнение 1) и рис. 1, вычерченного в масштабе.

## Вывод

---

---

---

---

---

---

---

---

## Контрольные вопросы

1. Поясните геометрический смысл слагаемых уравнения Д. Бернулли.
2. Поясните энергетический смысл слагаемых уравнения Д. Бернулли.
3. Как называется коэффициент  $\alpha$ , входящий в уравнение Д. Бернулли для потока реальной жидкости, что он учитывает, от чего зависит его величина и каков его физический смысл?
4. Объясните, чем обусловлены потери полного напора и каков их энергетический смысл?
5. Поясните, что понимают под термином "удельная энергия"?
6. Объясните термины "местная скорость" и "средняя скорость" и укажите, как определяют эти скорости?
7. Поясните, что такое скоростная трубка и трубка Пито?
8. Для каких расчетов гидродинамики судна, применяется уравнение Бернулли?
9. Поясните, что такое линия полного напора и пьезометрическая линия; что будут представлять собой эти линии при равномерном движении реальной жидкости?

## Перечень использованных информационных ресурсов

1. Альтшуль, А.Д. Гидравлические сопротивления [Текст] / А.Д. Альтшуль. М.: Недра, 1982. 224 с.
2. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика [Текст] / А.Д. Альтшуль, Л.С. Животовский, Л.П. Иванов. М.: Стройиздат, 1987. 414 с.
3. Богомолов, А.И. Гидравлика [Текст] / А.И. Богомолов, К.А. Михайлов. М.: Стройиздат, 1972. 648 с.
4. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений [Текст]: справочное пособие. М.: Энергия, 1988. 624 с.
5. Гиргидов, А.Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) [Текст]: учебник для вузов/ А.Д. Гидров. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 545 с.
6. Емцев, Б.Т. Техническая гидромеханика [Текст] / Б.Т. Емцев. М.: Машиностроение, 1987. 440 с.
7. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / И.Е. Идельчик. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.
8. Гиргидов, А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика) : учебник / А. Д. Гиргидов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : ИНФРА-М, 2021. — 704 с. - ISBN 978-5-16-013367-6. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1136795>
9. Константинов, Н.М., Петров Н.Н., Высоцкий Л.И., Гидравлика, гидрология, гидрометрия [Текст]: учебник для вузов. В 2 ч. / Н.М. Константинов, Н.Н. Петров, Л.И. Высоцкий. Ч.1. М.: Высш. шк., 1987. 304 с. Ч. 2. М.: Высш. шк., 1987. 431 с.
10. Павловский, Н.Н. Гидравлический справочник [Текст] / Н.Н. Павловский. Л.-М.: ОНТИ, НКТП, 1937. 890 с
11. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П.Г. Киселева. М.: Энергия, 1997. 312 с.
12. Чертоусов, М.Д. Гидравлика. Специальный курс [Текст] / М.Д. Чертоусов. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. 640 с.
13. Чоу, В.Т. Гидравлика открытых каналов [Текст] / В.Т. Чоу. М.: Стройиздат, 1969. 464 с.
14. Чугаев, Р.Р. Гидравлика[Текст]: учебник для вузов В 2 кн. / Р.Р. Чугаев. Кн.1. М.: Энергоатомиздат, 1991. 351 с. Кн. 2. М.: Энергоатомиздат, 1991. 367 с.
15. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика [Текст] / Д.В. Штеренлихт. М.: Колос, 2006. 656 с.
16. Ивашина Ю. К., Кулешова Е. М., Гамелаури А. А. Применение уравнения Бернулли к объяснению влияния помех на движение судов // Журнал: Актуальные научные исследование в современном мире — 2017 — с. 36–40.