

РАЗДЕЛ II

Гидроэнергетика



Значение ГЭС в энергетике



- Возобновляемый энергетический ресурс
- Простота технологического процесса
- Высокая надежность оборудования
- Высокий КПД – 85-90%
- Мобильное оборудование (пуск 1-2 минуты)
- Численность персонала в 5-8 раз меньше чем на ТЭС
- Низкие эксплуатационные затраты в 10 раз меньше чем на ТЭС

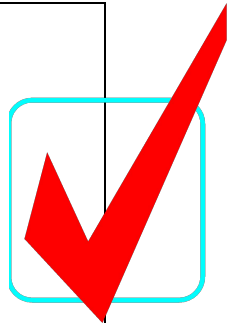
- Высокая стоимость строительства (около 2000 \$/кВт)
- Длительные сроки строительства (более 10 лет)
- Зависимость от гидрологических условий
- Зависимость от других участников водохозяйственной системы

Цели и задачи раздела

Цель данного раздела - изучение: физико-технических основ преобразования первичной гидроэнергетических ресурсов в электрическую энергию и основных технологических схем.

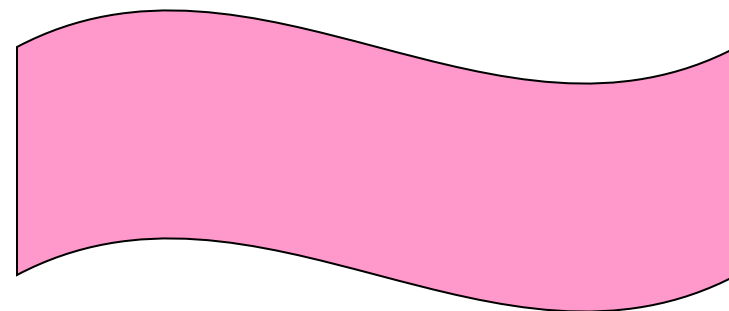
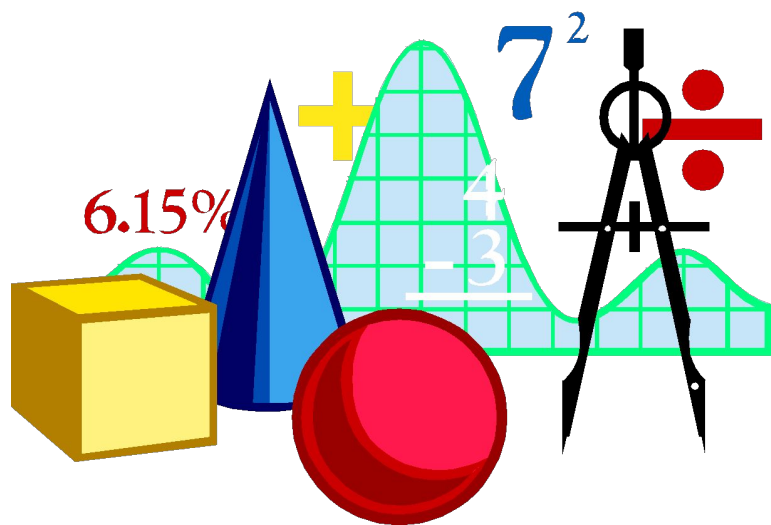
Знакомство с отдельными типовыми конструктивными элементами, характеризующих технологический процесс преобразования и определяющих экономические показатели станции.

- **Основные темы раздела:**
- Основные законы гидравлики
- Гидроэнергетические ресурсы и схемы их использования
- Водноэнергетические показатели ГЭС
- Водноэнергетическое регулирование водохранилищ
- Участники водохозяйственного комплекса и их интересы
- Технологическая схема преобразования гидравлической энергии в электрическую
- Энергетические характеристики гидроагрегатов и ГЭС в целом
- Гидротехнические сооружения гидроузлов



Тема II-1

Основные законы гидравлики



тема: Основные законы гидравлики

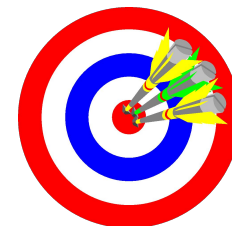
План лекции

1. Физико-технические свойства энергоносителя.
2. Показатели и параметры характеризующие энергоноситель.
3. Основные законы гидравлики.
4. Энергетическое уравнение Бернулли для жидкости.



Цель лекции

Изучение физических законов связывающих параметры жидкости в их динамике и статике.



Задачи

1. Проанализировать физические параметры, характеризующие жидкость.
2. Показать связи физических параметров, исходя из закона сохранения массы.
3. Показать связи физических параметров жидкости, исходя из закона сохранения энергии.
4. Дать физическую и геометрическую интерпретацию параметров в уравнении Д. Бернулли.



Физические свойства жидкости

Жидкость - физическое тело, обладающее свойствами:

- мало меняет свой объем при изменении давления и температуры;
- обладает свойством текучести.

Физические параметры:

Плотность: $\rho = \frac{M}{W} = \frac{\text{масса}}{\text{объем}} = \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right]; \quad \rho_{\text{воды}} = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$

Объемный вес: $\gamma = \frac{G}{W} = \frac{\text{вес}}{\text{объем}} = \left[\frac{\text{Н}}{\text{м}^3} \right]; \quad \gamma_{\text{воды}} = 9810 \text{ Н/м}^3$

$$G = gM;$$

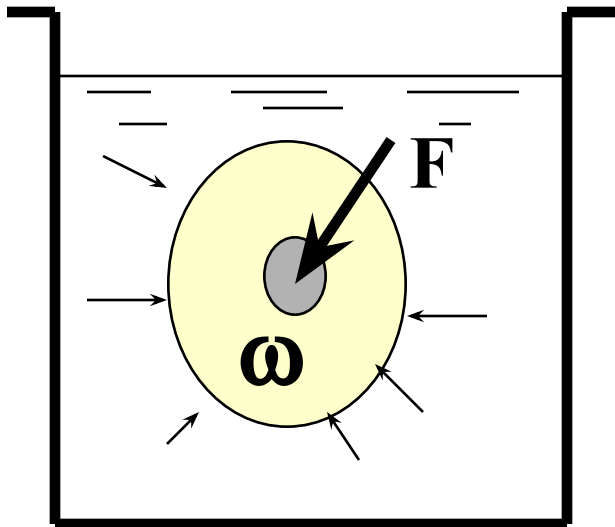
$$\gamma = \rho g; \quad \rho = \frac{\gamma}{g};$$

где: $g = 9,81 \text{ м}^3/\text{с}^2$



Гидростатическое давление

Гидростатическое давление в точке:



$$p = \lim_{\omega \rightarrow 0} \left(\frac{F}{\omega} \right);$$

где: F - сила, ω - площадь

Сила давления:

$$P = \int_{\omega} p \, d\omega;$$

Свойства давления:

- действует по нормали к выделенной площадке;
- величина давления не зависит от ориентации площадки



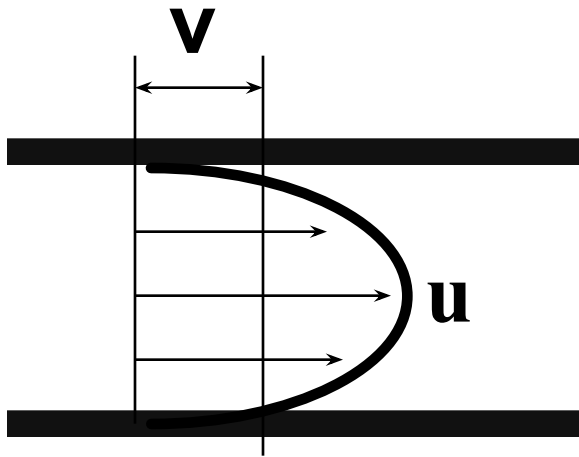
Расход и скорость жидкости

Объемный расход: $Q = \frac{W}{T} = \frac{\text{объем}}{\text{время}} = \left[\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right];$

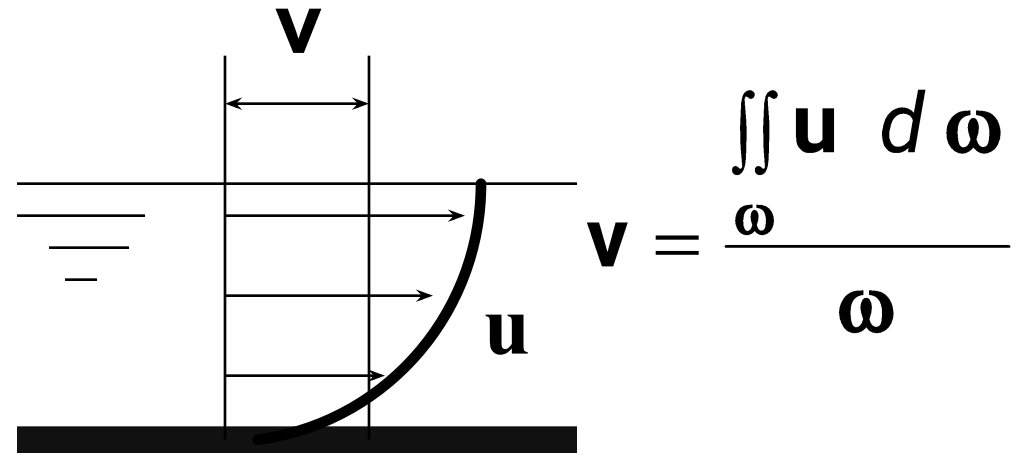
Средняя скорость: $v = \frac{Q}{\omega} = \frac{\text{расход}}{\text{площадь сечения}} = \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right];$

ω - площадь "живого" сечения, расположенного по нормали к потоку

Распределение скоростей по сечению



а) напорный трубопровод

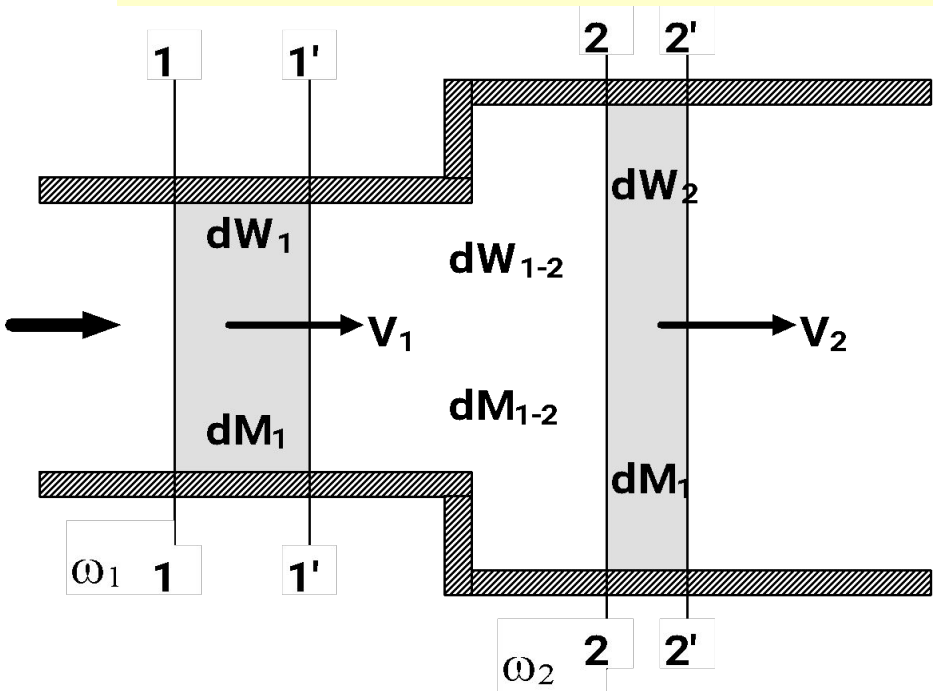


б) открытый поток

u - скорость потока в точке ("мгновенная")



Уравнение неразрывности потока



Закон сохранения массы:

$$dM_1 = dM_2$$

Условия:

- поток сплошной;
- жидкость несжимаема;
- нет дополнительных притоков и оттоков

Вывод уравнения:

$$dM_1 = \rho dW_1 = Q_1 dt;$$

$$dM_2 = \rho dW_2 = Q_2 dt$$

Основные соотношения:

$$Q_1 = Q_2; \quad \frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

Уравнение для общего случая :

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n = \text{Const}$$



Уравнение Д. Бернулли

Уравнение Даниила Бернулли является основным уравнением гидродинамики. Введем понятия удельной энергии элементарной струйки и потока жидкости.

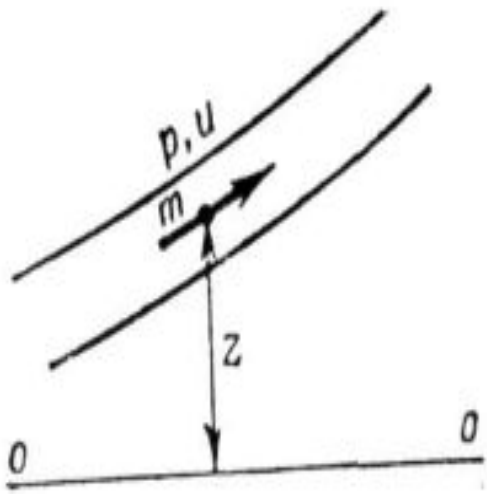


рис. 1.

1. Удельная энергия элементарной струйки. Напомним, что удельная энергия есть энергия, отнесенная к единице силы тяжести жидкости.

Пусть имеем в элементарной струйке частицу массой m , которая обладает некоторой скоростью u , находится под гидродинамическим давлением p , занимает некоторый объем V и находится от произвольной плоскости сравнения $o-o$ на некоторой высоте z (рис. 1).

Масса частицы обладает запасом удельной потенциальной энергии e_p , которая складывается из удельных потенциальных энергий положения $e_{пол}$ и давления $e_{дав}$.

В самом деле, масса жидкости, поднятая на высоту z , имеет запас потенциальной энергии, равный mgz , где g – ускорение свободного падения.

Удельная потенциальная энергия положения равна потенциальной энергии, деленной на силу тяжести жидкости (mg)

$$e_{пол} = \frac{mgz}{mg} = z$$

Масса жидкости занимает некоторый объем V , находящийся под давлением p .

Потенциальная энергия давления равна pV .

Удельная же потенциальная энергия давления равна потенциальной энергии pV , деленной на силу тяжести данного объема γV , т.е.

$$e_{\text{дав}} = \frac{pV}{\gamma V} = \frac{p}{\gamma}$$

Полный запас удельной потенциальной энергии массы ж равен их сумме, т. е.

$$e_n = e_{\text{дав}} + e_{\text{пол}}$$

$$e_n = p/\gamma + z \quad (1)$$

Кроме того, масса жидкости m движется со скоростью u и обладает кинетической энергией

$$mu^2/2;$$

но сила тяжести этой массы равна mg , и удельная кинетическая энергия струйки равна

$$e_k = \frac{mu^2}{2} / mg = \frac{u^2}{2g} \quad (2)$$

Складывая выражения (1) и (2), получим выражение полной удельной энергии элементарной струйки

$$e = \frac{u^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z \quad (3)$$

2. Уравнение Д. Бернулли для элементарной

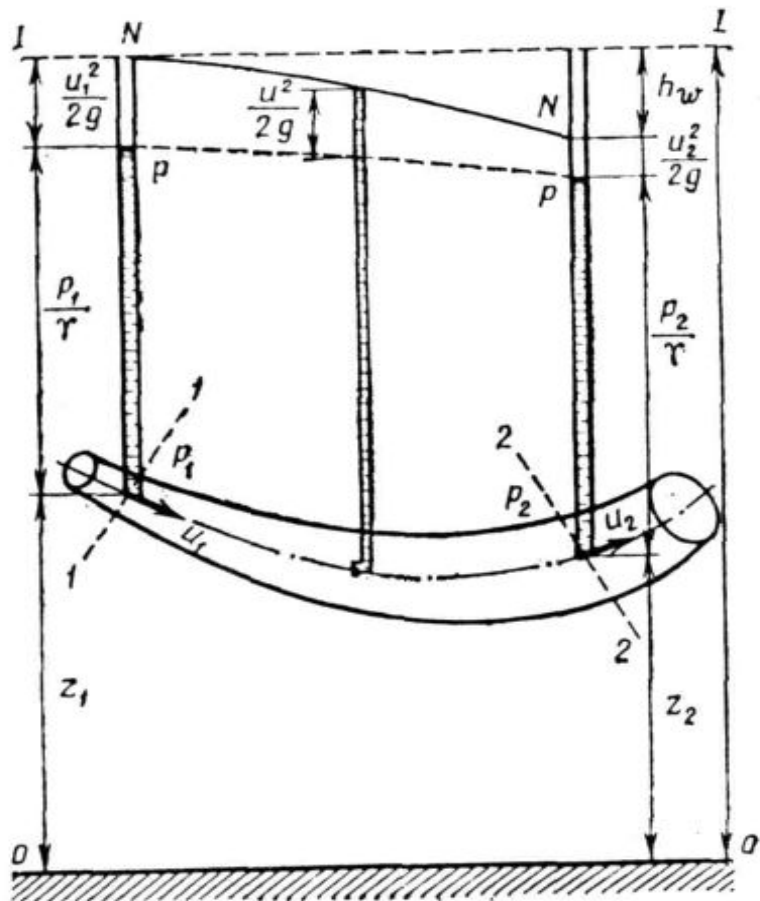


Рис.2.

Выделим в потоке реальной жидкости элементарную струйку (рис. 2) и определим удельную энергию жидкости в двух произвольных сечениях 1-1 и 2-2.

z_1 и z_2 -высоты положения центров 1-го и 2-го сечений соответственно;

p_1 и p_2 - гидродинамическое давление в этих же точках;

u_1 и u_2 - скорости течения.

Тогда полная удельная энергия элементарной струйки в сечении 1-1 на основании формулы (3) равна

$$e_1 = \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1$$

а в сечении 2-2

$$e_2 = \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2$$

Практически всегда $e_2 < e_1$,

так как часть полной энергии затрачивается на преодоление сил сопротивления (трения) при движении жидкости от сечения 1-1 к сечению 2-2. Обозначим эти потери h_w

Тогда в соответствии с законом сохранения энергии можно написать, что

$$e_1 = e_2 + h_w$$

$$\frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_w$$

Это и есть уравнение Бернулли для элементарной струйки

3. Уравнение Д. Бернулли для потока

Поток жидкости рассматривается как совокупность n элементарных струек, каждая из которых обладает своей удельной кинетической энергией $u^2/2g$.

Среднее значение этой величины в сечении потока будет равно:

$$E_k = \left(\frac{u_1^2}{2g} + \frac{u_2^2}{2g} + \dots + \frac{u_n^2}{2g} \right) / n = \alpha \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Здесь α – коэффициент Кориолиса, учитывающий неравномерность распределения скоростей по сечению потока (или корректив кинетической энергии).

Безразмерный коэффициент α представляет собой отношение действительной кинетической энергии потока к кинетической энергии, вычисленной по средней скорости.

Тогда уравнение Бернулли для потока в сечениях 1 и 2 будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + h_{\omega}$$

v_1 и v_2 – средние скорости в сечениях 1-1 и 2-2.

α_1 и α_2 – коэффициенты Кориолиса по сечениям. Обычно принимают $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$.

На основе обработки многочисленных данных, полученных на реках и каналах, установлено, что для больших открытых потоков $\alpha \approx 1,1$. При равномерном движении в трубах и каналах практически $\alpha \approx 1,0 \div 1,5$.

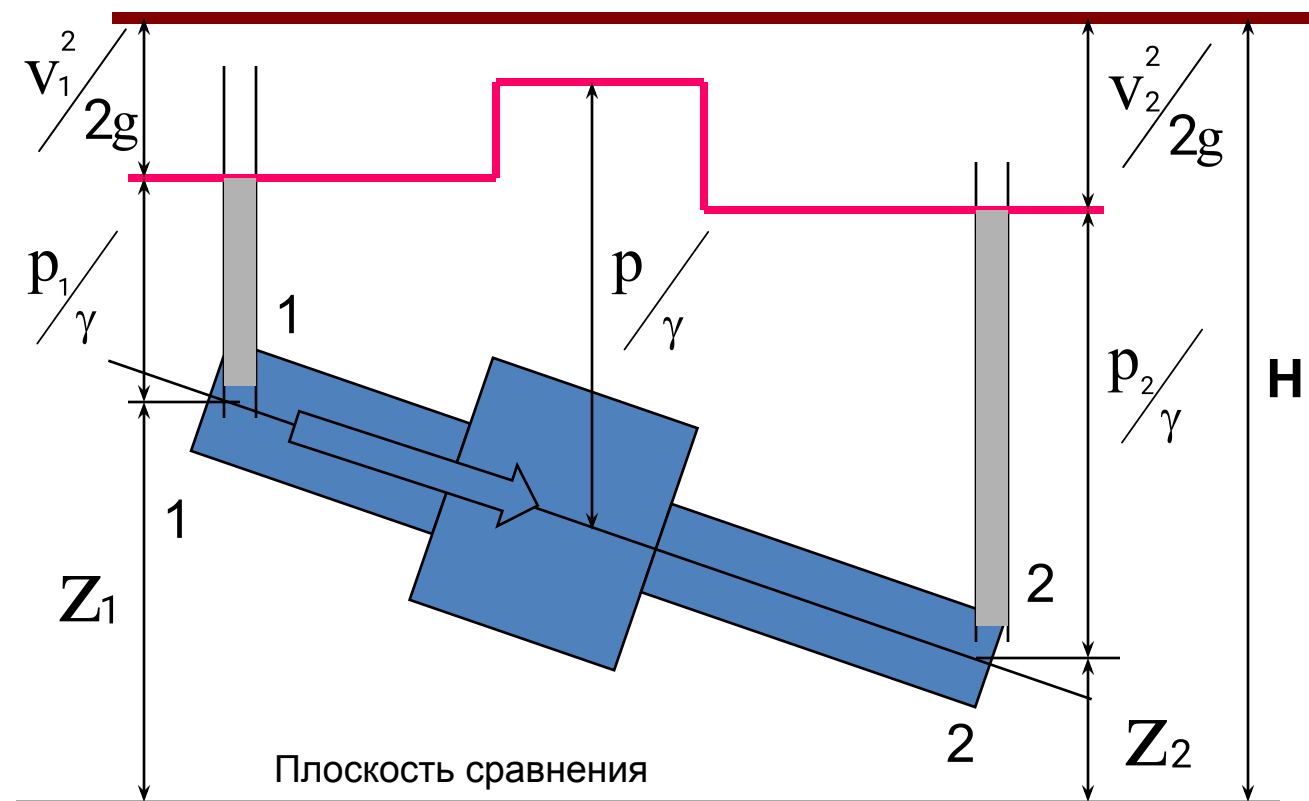
В практических расчетах обычно принимают $\alpha = 1,0$.

Тогда формула

Бернулли упрощается:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{\omega}$$

Геометрический и энергетический смысл уравнения Бернулли



Полный напор

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = \text{Const}$$

Удельная кинетическая энергия

$$\mathcal{E}_{\text{уд}}^{\text{кин}} = \frac{v^2}{2g}$$

Удельная потенциальная энергия давления

$$\mathcal{E}_{\text{уд}}^{\text{пот давл}} = \frac{p}{\gamma}$$

Удельная потенциальная энергия положения

$$\mathcal{E}_{\text{уд}}^{\text{пот пол}} = z$$

Уравнение Бернулли отражает закон сохранения энергии для движущейся жидкости

$$H = \mathcal{E}_{\text{уд}}^{\text{кин}} + \mathcal{E}_{\text{уд}}^{\text{пот давл}} + \mathcal{E}_{\text{уд}}^{\text{пот пол}} = \mathcal{E}_{\text{уд}}^{\text{полное}} = \text{Const.}$$

Определение: Напор - полная удельная энергия единицы веса жидкости