

В. А. БАРАНОВ

РАЦИОНАЛЬНЫЙ ТИП  
МАЛОЙ

Г Э С



ГОСИЗДАТ УзССР • ТАШКЕНТ • 1948

ТРУДЫ СРЕДНЕАЗИАТСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ИРРИГАЦИИ

*Выпуск 64*

---

**В. А. БАРАНОВ**

Кандидат технических наук

РАЦИОНАЛЬНЫЙ ТИП  
МАЛОЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

---

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО УзССР  
ТАШКЕНТ — 1948

## 1. О СТРОИТЕЛЬСТВЕ МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА КАНАЛАХ ИРРИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ.

Постановление партии и правительства о мероприятиях по электрификации сельского хозяйства предусматривает широкое использование запасов гидравлической энергии малых рек и ирригационных каналов путем строительства многих сотен колхозных гидроэлектростанций малой мощности. Намеченный на четвертую пятилетку план строительства этих станций требует огромных затрат материальных средств и рабочей силы. Это обстоятельство выдвигает первоочередную задачу — рационализировать конструкцию малых гидроэлектростанций с целью экономии дефицитных строительных материалов, сокращения объема строительных работ и сроков строительства, усовершенствования машинных агрегатов и т. д.

Ввиду разнообразного рельефа местности на территории УзССР в „малой гидроэнергетике“ используются напоры в широких пределах — от 1 до 100 м. Однако, принимая во внимание, что сельскохозяйственные гидроэлектростанции в подавляющем большинстве своем располагаются на каналах ирригационных систем, где используемые напоры составляют в среднем 3,5 м, наибольшее распространение в УзССР получают малые станции низконапорных типов, относящиеся к разряду установок, требующих относительно высоких капитальных затрат на единицу мощности.

Низконапорные колхозные ГЭС строятся в УзССР преимущественно по типовым проектам Узбексельэлектро, в которых за основной строительный материал принят жженный кирпич, а для стен здания — даже сырцовый. Значительно сокращен также расход бетона и лесоматериалов (см. рис. 1). На них устанавливаются одна или две вертикальные открытые турбины Френсиса или пропел-

лерные диаметром в 0,5—0,8 м с ручной регулировкой. В типовых проектах станций предусматривается также установка упрощенных деревянных пропеллерных гидротурбин до 1 м в диаметре. В их электрическом оборудовании наибольшее распространение имеют генераторы

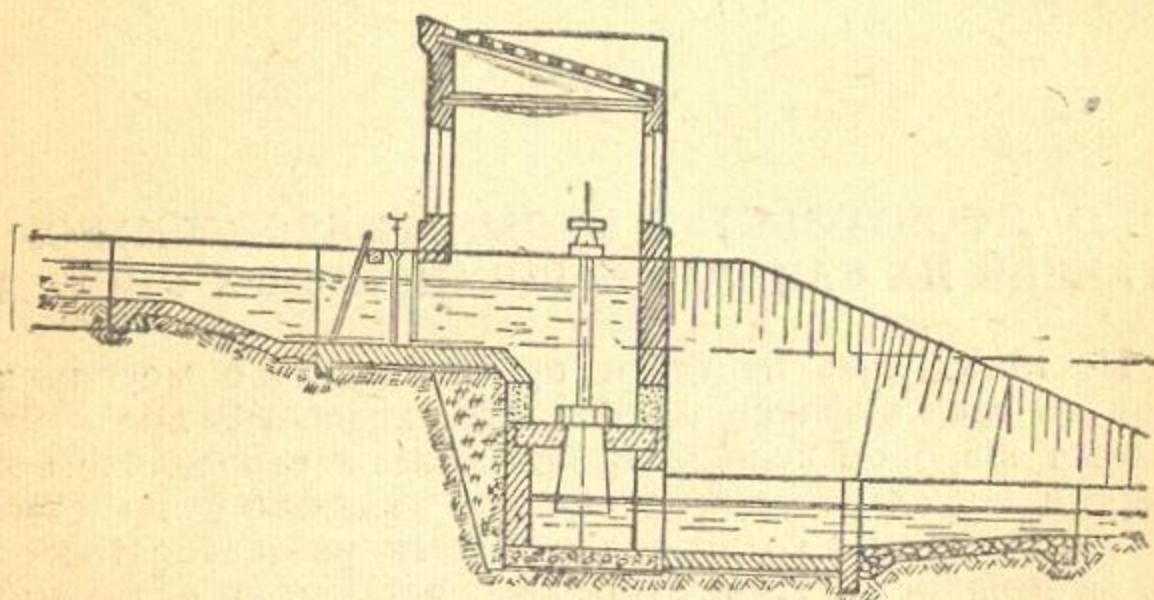


Рис. 1. Эскиз колхозной гидроэлектростанции для напоров до 5 м по типовому проекту Узбексельэлектро 1945 г.

трехфазного тока типа СГ мощностью от 15 до 60 кВА при 1000 оборотах в минуту. Последние приводятся в действие посредством ременной передачи с вертикального вала турбины или (если число оборотов турбины оказывается недостаточным или имеется в виду приведение в движение еще какой-либо машины) устанавливается промежуточный трансмиссионный вал.

Необходимо отметить, что, вследствие слишком узкой номенклатуры турбин, выпускаемых местными заводами, строительство этих станций испытывает в настоящее время некоторые затруднения. Так, из числа пропеллерных турбин, не считая деревянных, в настоящее время в УзССР выпускаются турбины только одной марки ПРК-70 ВО-60 с рабочим колесом типа К-70 диаметром в 600 мм, так что говорить о подборе турбоагрегатов для различных условий работы почти не приходится.

Рационализация описанного типа станций особенно важна потому, что она может дать наибольший эффект для всего строительства в целом. Немалую роль в этом деле должно сыграть расширение номенклатуры производства гидротурбин малой мощности,

## II. ЗАДАЧИ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.

Рационализация любого производства связана с различными усовершенствованиями, достигаемыми в большинстве случаев путем некоторых упрощений. Основной целью рационализации является достижение определенного производственного эффекта без снижения качества продукции и увеличения ее стоимости, в противном случае рационализация превращается в упрощение со всеми его вредными последствиями. В данном случае целью строительства станции является производство электрической энергии, характеризующейся определенными качествами (напряжение, частота) и стоимостью.

Упрощение конструкции гидротурбины, касающееся ее рабочих органов, в большинстве случаев вызывает снижение ее коэффициента полезного действия и, следовательно, уменьшение выработки энергии. Кроме того, на полный коэффициент полезного действия гидросиловой установки оказывает влияние потеря напора в подводящих и отводящих сооружениях. Предпринимаемое с целью экономии строительных материалов упрощение конструкции сооружений, связанное с уменьшением живых сечений водоводов, также приводит к уменьшению количества вырабатываемой энергии.

С другой стороны, упрощения в машинном оборудовании, особенно в сооружениях станций, снижая стоимость капитальных затрат и ремонта, удешевляют стоимость эксплуатации.

В зависимости от степени удешевления эксплуатации при снижении полного коэффициента полезного действия установки в результате упрощения ее конструкции стоимость вырабатываемой энергии должна снижаться, но в некоторых случаях может даже несколько возрастать. Таким образом, критерием оценки эффективности мероприятий по рационализации конструкции малой гидроэлектростанции должны являться экономия затрачиваемых строительных материалов, денежных средств, уменьшение сроков производства работ в сопоставлении с относительным изменением стоимости вырабатываемой энергии в рассматриваемых вариантах проекта ГЭС.

Необходимо отметить, что в отдельных случаях может оказаться допустимым некоторое временное увеличение стоимости вырабатываемой энергии, если оно спо-

способствует быстрому решению более важной народнохозяйственной задачи.

Приводим следующие расчеты:

Стоимость вырабатываемой энергии (отнесенной к валу турбины) равна:

$$e = \frac{S}{T \cdot N},$$

где  $S$ —годовая стоимость эксплуатации ГЭС, приходящаяся на один агрегат,

$T$ —число часов работы агрегата в году,

$N$ —эффективная мощность турбины.

В данном случае надо определить зависимость этой величины от коэффициента полезного действия турбины, потери напора в подводящих и отводящих сооружениях гидроэлектростанции, стоимости ее строительной части и оборудования.

Исходя из принятого для сельскохозяйственных гидроэлектростанций способа подсчета эксплуатационных расходов\*, годовую стоимость эксплуатации гидросиловой установки малой мощности можно представить в следующем виде:

$$S = (a \cdot C_1 + b \cdot C_2 + C_3) \cdot m \dots \dots (1)$$

где  $C_1$ —сумма капитальных затрат по сооружениям,

$C_2$ —сумма затрат по машинному оборудованию,

$C_3$ —сумма годовых расходов на содержание штата (с начислениями), на эксплуатационные материалы (смазку и обтирку) и пр.,

$a \approx 0,06$ —коэффициент отчислений на амортизацию и ремонт сооружений,

$b \approx 0,1$ —коэффициент отчислений на амортизацию и ремонт машинного оборудования,

$m \approx 1,1$ —коэффициент отчислений на административно-хозяйственные расходы, налоги и пр.

Эффективная мощность турбины, представленная с учетом влияния на ее величину потерь гидравлической

---

\* См. Н. К. Кузнецов и А. П. Златковский — «Сельскохозяйственные гидроэлектростанции», ОГИЗ, 1941 г.

Для одноагрегатной установки мощностью ниже 50 кВт принимают 2—3 единицы штатного состава плюс 1000 руб. в год на смазочные и обтирочные материалы.

энергии в системе сооружений гидроэлектростанции, равна:

$$N = N_{вод} \cdot (1 - \xi) \cdot \eta \dots \dots \dots (2)$$

где  $N_{вод}$  — водяная мощность, подсчитанная по напору брутто,

$$\xi = \frac{\Sigma h}{H} \text{ брутто} \text{ — коэффициент суммы потерь напора в}$$

системе подводящих и отводящих сооружений ГЭС,

$\eta$  — коэффициент полезного действия гидротурбины.

На основании уравнений 1 и 2 отношение проектных стоимостей вырабатываемой энергии на валу турбины по подлежащим сравнению вариантам гидросиловой установки получается равным:

$$\frac{e^1}{e} = \frac{(1 - \xi) \cdot \eta \cdot S^1}{(1 - \xi^1) \cdot \eta^1 \cdot S} \dots \dots \dots (3)$$

При этом имеется в виду, что число часов работы машинных агрегатов остается без изменения.

На основании последнего уравнения (3) стоимость вырабатываемой энергии после реконструкции станции не увеличится, если связанный с реконструкцией прирост коэффициента потери напора в системе подводящих и отводящих сооружений не превзойдет величины, равной:

$$\Delta \xi = \xi^1 - \xi = (1 - \xi) \cdot \left(1 - \frac{S^1 \cdot \eta}{S \cdot \eta^1}\right) \dots \dots \dots (4)$$

Таким образом, формула 4 определяет логическую границу между рационализацией и упрощением в строительстве малых гидроэлектростанций. Однако, пользуясь этой формулой, надо в каждом отдельном случае иметь в виду наше замечание (см. выше) об учете народнохозяйственного значения данного строительства.

Удельная стоимость низконапорной гидроэлектростанции малой мощности (не считая деривации) по типовым проектам Узбексельэлектро (1945 г.) составляет в среднем 6000 руб. на 1 кВт, причем около одной трети ее приходится на машинное оборудование.

Если допустить, что в результате реконструкции строительной части одноагрегатной гидроэлектростанции мощностью в 30 кВт (распространенный тип станции) окажется возможным уменьшить объем и расход строительных материалов (в денежном выражении, например, на 30% стоимости строительной части), то, согласно уравнению 1,

соответствующее снижение годовой стоимости эксплуатации по отношению к первоначальной ее величине будет приблизительно равно:

$$\frac{S^1}{S} = \frac{30 \cdot 6000 (0,7 \cdot 0,06 \cdot \frac{2}{3} + 0,1\frac{1}{3}) + 15.000}{30 \cdot 6000 (0,06 \cdot \frac{2}{3} + 0,1\frac{1}{3}) + 15.000} \approx 0,9$$

Если принять далее, что коэффициент полезного действия турбины не изменяется, и потеря напора в сооружениях станции первоначально составляет 10%, то по уравнению 4 допустимый прирост ее получается равным:

$$\Delta \xi = (1 - 0,1) \cdot (1 - 0,9) \cdot 100 = 8\%.$$

Эта величина в дальнейшем послужит ориентиром при оценке эффективности предлагаемых схем рационализации стационарного узла гидроэлектростанции.

Приводим принятые общие положения, относящиеся к принципам рационализации конструкции малых ГЭС.

1. Применение на малых гидроэлектростанциях упрощенных гидротурбин кустарного производства с коэффициентом полезного действия, сниженным на 20% и больше по сравнению с турбинами современных типов, является мероприятием временного характера.

2. Гидросиловая установка с примитивной турбиной требует максимально удешевленных примитивных сооружений с таким расчетом, чтобы потери напора в них были минимальны (формула 3).

3. Применение турбины с высоким коэффициентом полезного действия дает возможность немного уменьшить размеры гидросооружений стационарного узла, увеличивая скорость движения воды в них (формула 4). В первую очередь это относится к турбинной камере.

4. Одним из наиболее эффективных методов рационализации малых гидроэлектростанций является автоматизация их с целью сокращения эксплуатационных расходов на обслуживание (слагаемое  $C_3$  в уравнении 1).

### III. ВОЗМОЖНОСТИ УДЕШЕВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.

В составе стационарного узла низконапорной гидроэлектростанции малой мощности наиболее дорогой и трудоемкой является его строительная часть. По данным Бюро малых ГЭС Гидроэнергопроекта, стоимость основных частей стационарного узла одноагрегатных низкона-



порных гидроэлектростанций мощностью от 25 до 150 л.с. составляет (в процентах к общей стоимости):

Строительная часть . . . . .	: . 63—67
Гидромеханическое оборудование . . . . .	: . 26—30
Электрическое . . . . .	: . 6—8

В строительной части станционного узла, наиболее дорогой и сложной по производству работ является подводная (вернее, подземная) часть здания ГЭС. Стоимость ее превышает половину стоимости строительной части, т. е. составляет свыше 30% всей стоимости

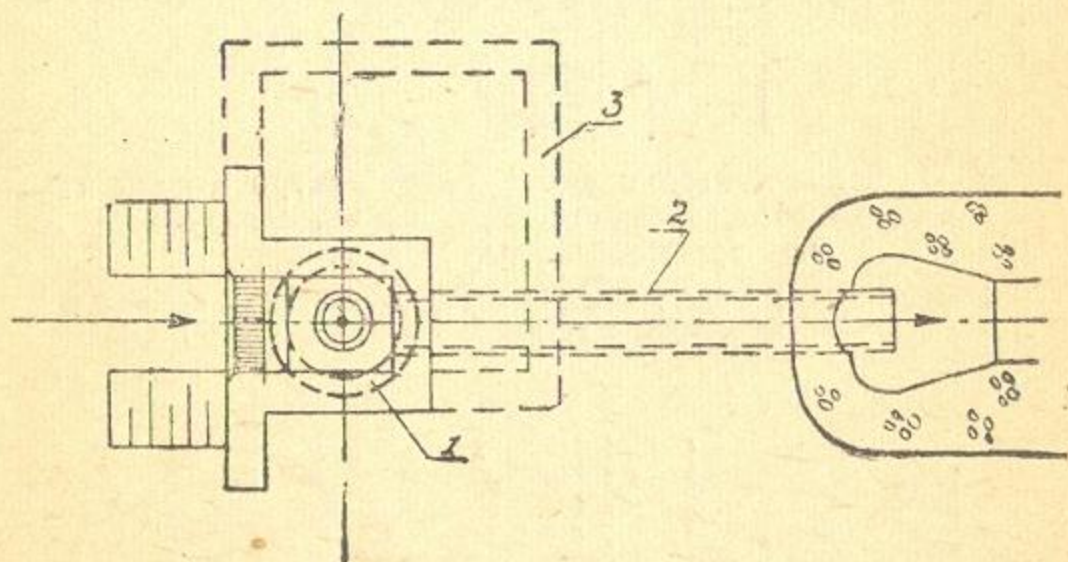


Рис. 2. Схема 1 низконапорной гидроэлектростанции малой мощности с вертикальной турбиной в открытой камере и водоотводящей трубой, сокращающей подводную часть здания.

1 — турбина; 2 — водоотводящая труба; 3 — станционное здание.

станции. Значительного сокращения объема строительных работ или даже полного освобождения от подводной части здания можно достигнуть путем отвода воды из турбины по трубе в сторону от машинного здания\*.

\* Это предложение внесено нами на заседании Среднеазиатского научно-исследовательского института ирригации в 1914 году по теме „Гидросиловые установки малой мощности на ирригационных системах“. Кроме того, в журнале „Гидротехническое строительство“ № 9 за 1937 г. имеется аналогичное предложение инж. С. Н. Милосердова, относящееся к средненапорным гидроэлектростанциям мощностью порядка 2000 л. с. в агрегате, в котором приведены основы гидравлического расчета удлиненной всасывающей трубы турбины.

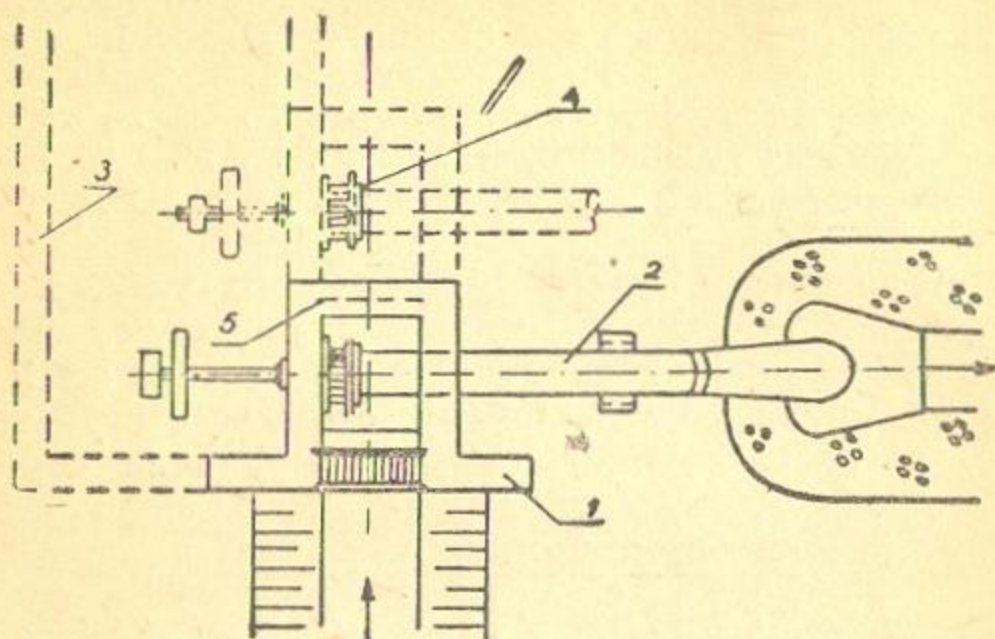


Рис. 3 Схема 2 низконапорной гидроэлектростанции малой мощности без подводной части здания с горизонтальной турбиной в открытой камере.

1 — турбинная камера; 2 — водоотводящая труба; 3 — машинное здание; 4 — второй агрегат; 5 — шандорная стенка.

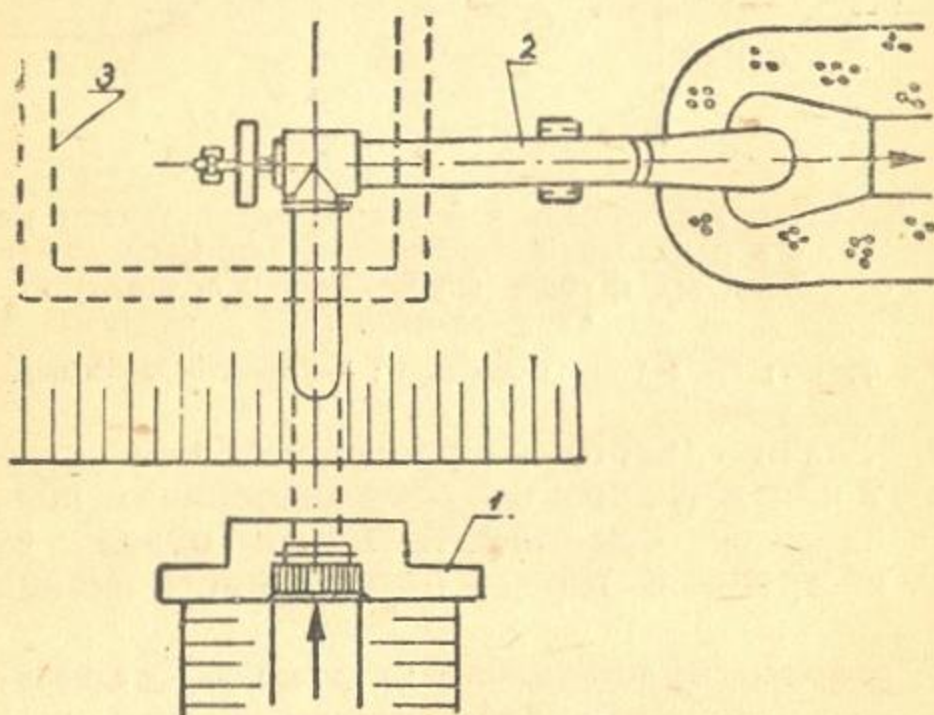


Рис. 4. Схема 3 малой гидроэлектростанции без подводной части здания с горизонтальной закрытой турбиной для средних и низких напоров.

1 — водозаборная камера; 2 — водоотводящая труба; 3 — машинное здание.

На рис. 2, 3 и 4 представлены в плане три схемы гидросиловых установок малой мощности без подводной части здания применительно к турбинам различных типов.

По схеме 1 подводная часть здания станции заменяется круглым колодцем, в который спущена всасывающая труба турбины. К нижней части колодца присоединена горизонтальная труба, проходящая под землей на глубине, соответствующей уровню воды в отводящем канале.

В данном случае водоотводящая труба не испытывает вакуума, поэтому плотность ее не имеет особого значения. Она может быть выполнена из бетонных колец, кирпичной кладки и т. п., что является основным преимуществом этой схемы.

Указанным способом достигается довольно значительное уменьшение объема кладки по станционному узлу с вертикальной турбиной. Особенно возрастает эффективность предлагаемого метода рационализации малых гидроэлектростанций с применением горизонтальных турбин.

Схема 2 представляет вариант низконапорной установки с горизонтальной турбиной открытого типа, смонтированной в кирпичной камере. Турбинная камера имеет минимальные размеры, допустимые с точки зрения гидравлических расчетов и удобства разборки турбины для ремонта. Всасывающая труба турбины, удлиненная в горизонтальном направлении, отводит воду в канал, проходящий в стороне от машинного здания (намечен пунктиром). Здесь же показана пунктиром установка второго агрегата. Вторая турбина монтируется в общей камере с первой и может быть отделена от нее для ремонта шандорной стенкой. Для ремонта первой турбины надо, очевидно, остановить всю станцию.

Таким образом, по схеме 2 установка двух турбин в общей камере с последовательным расположением их одной за другой от входа в камеру не увеличивает частоты необходимых для ремонта турбин остановок всей станции по сравнению с одноагрегатной станцией, в то же время это позволяет сократить размеры сдвоенной камеры и упростить ее конструкцию.

Следует еще отметить, что установка двух агрегатов рациональна при турбинах пропеллерного типа, так как неустойчивая рабочая характеристика последних препятствует их эффективному использованию при малом открытии направляющего аппарата.

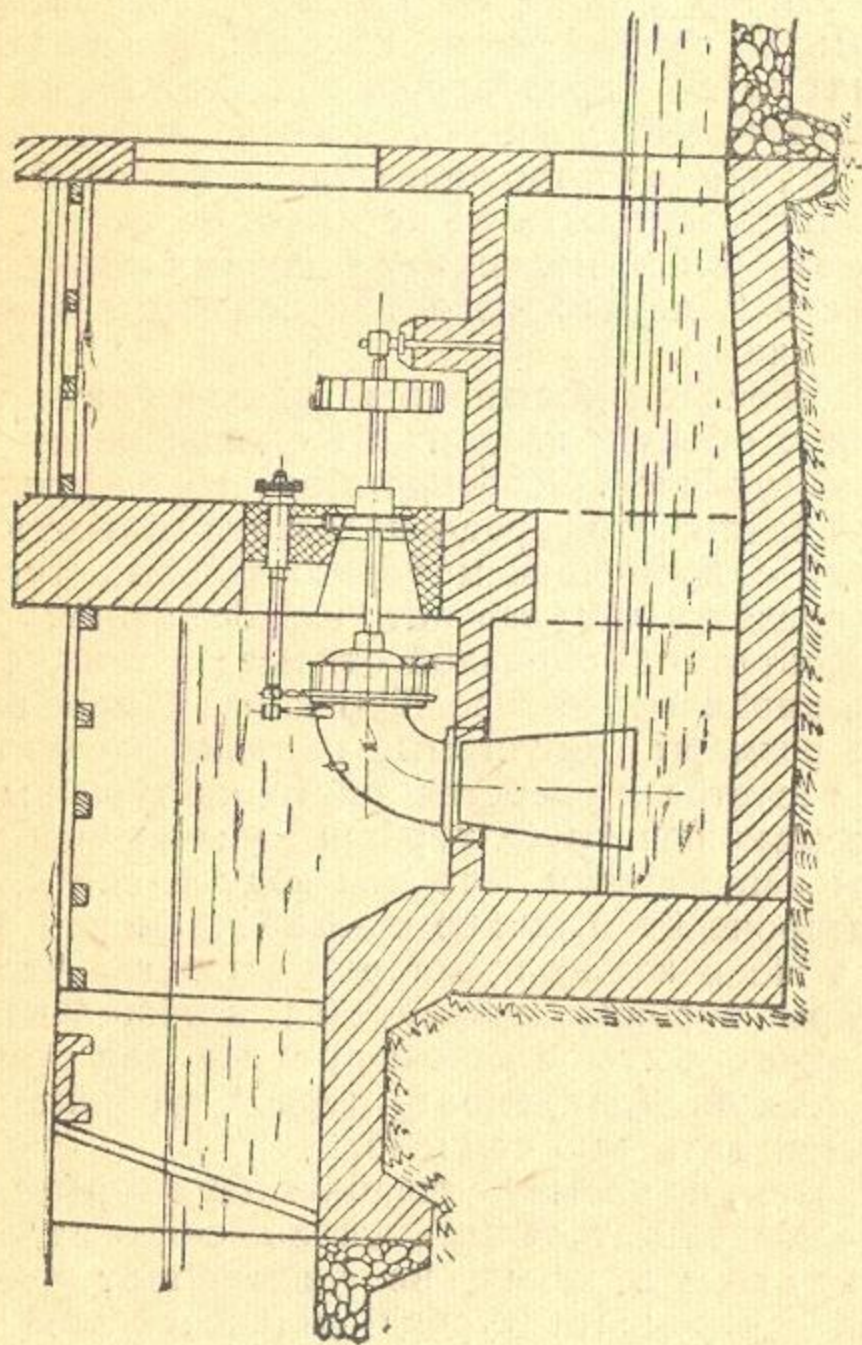


Рис. 5. Низконапорная гидростатическая установка обычного типа.

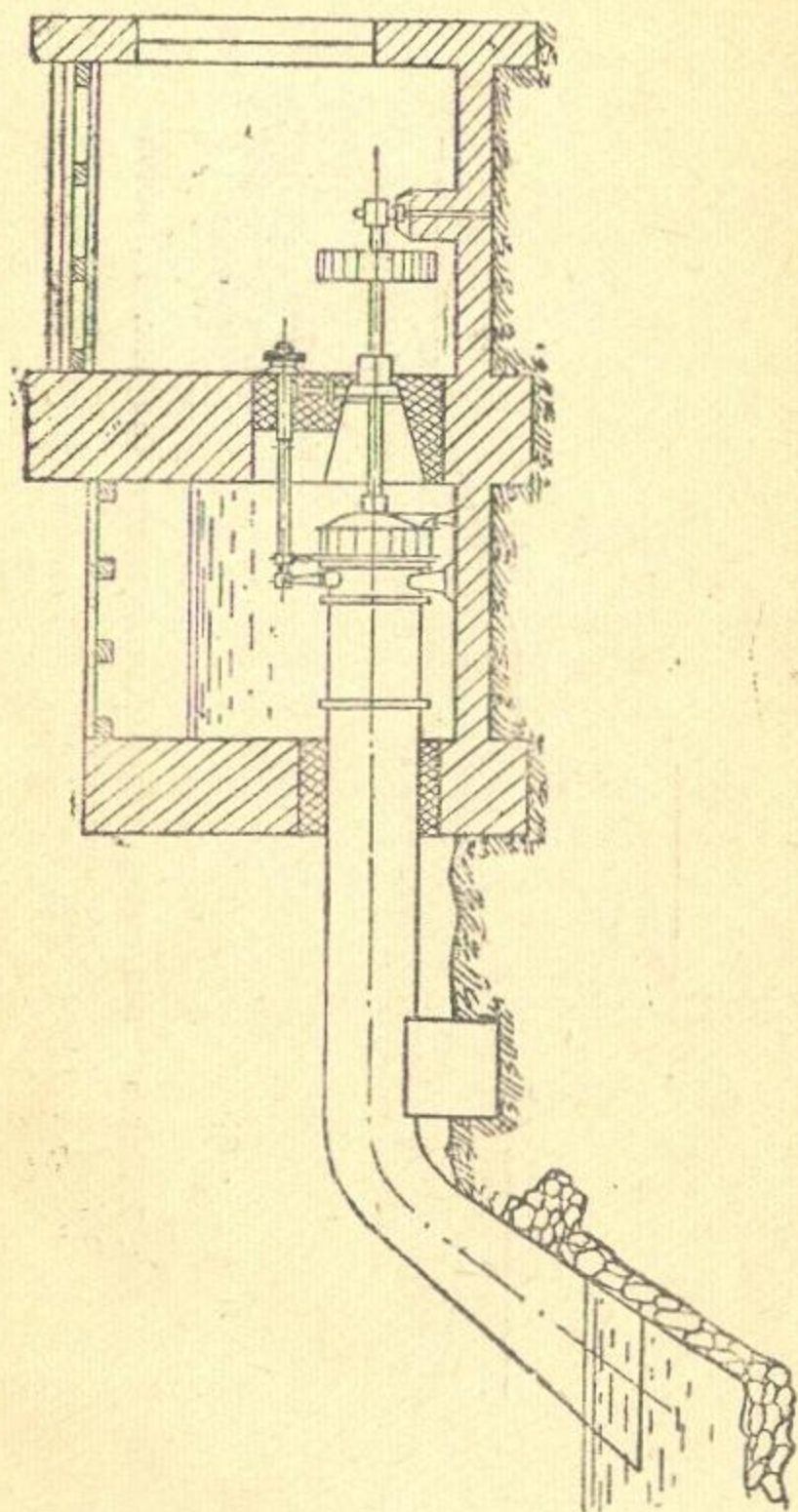


Рис. 6. Гидросиловая установка без подводной части здания по схеме 2.

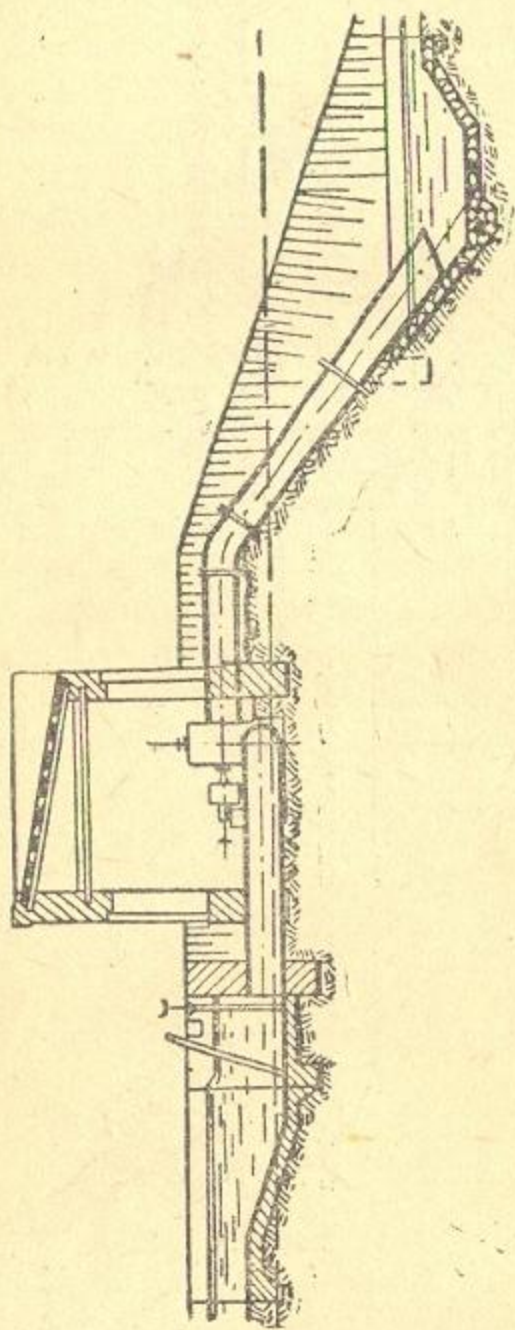


Рис. 7. Эскиз колхозной гидроэлектростанции (по рис. 1), реконструированный по схеме 3.

Добавочная потеря напора в удлиненной части всасывающей турбины при диаметре ее в 700 мм, длине в 10 м и расходе воды в 1,2 куб. м в секунду, соответствующем мощности агрегата в 30 кВт при напоре в 4 м составит около 0,2 м, т. е. не больше 5% напора брутто. В то же время экономия в капитальных затратах, несомненно, значительно превысит 30% стоимости строительной части станции ввиду полного отказа от подводной части здания.

Таким образом, приведенные данные показывают, что реконструкция малой гидроэлектростанции по схеме 2 наряду со значительной экономией в строительной части может снизить стоимость электроэнергии. Этим подтверждается полная рациональность данного предложения.

Для сравнения приведены рис. 5, 6 (стр. 12 — 13).

По схеме 3 турбина устанавливается на обычном небольшом фундаменте. Кожух может быть любого типа: спиральный, фронтальный, цилиндрический с боковым подводом воды (показан на схеме) и т. д. Вода подводится к турбине и отводится от нее по трубам, причем всасывающая труба турбины, удлиненная в горизонтальном направлении, отводит воду за пределы машинного здания. Последнее располагается в стороне от отводящего канала и водозаборной камеры. Оно может быть построено по типу обычных машинных помещений на сухом месте, так как совершенно отделено от воды.

Эффективность этой схемы рационализации малой ГЭС иллюстрируется следующим примером:

Для колхозной станции, изображенной на рис. 1, по типовому проекту Узбексельэлектро, при напоре в 4 м и расходе в 1,2 куб. м в секунду объем основных строительных работ составляет:

Земляные работы . . . . .	1200 куб. м
Каменная отмостка . . . . .	100 кв. м
Кладка из жженого кирпича . . . . .	120 куб. м
Кладка из сырцового кирпича . . . . .	50 "
Бетон и железобетон . . . . .	13 "
Цементная штукатурка . . . . .	210 кв. м
Известковая " . . . . .	270 "
Плотничные работы . . . . .	100 "
Столярные " . . . . .	10 "
Металлоконструкции (без гидротурбины и транс- миссии, которые весят около 1,5 т) . . . . .	350 кг

Переконструирование этой установки по схеме 3 (как показано на рис. 7) принесет следующую экономию основных строительных работ (в процентах).

По земляным работам . . . . .	50
По кладке из жженого кирпича . . . . .	40
По бетону и железобетону . . . . .	70
По штукатурке цементом . . . . .	80

При этом вес металлоконструкций увеличивается не больше, чем на 1,3 т за счет трубопровода диаметром в 700 мм и турбинного кожуха.

Ввиду того, что всасывающая труба в схемах 2 и 3 должна обеспечивать сохранение в ней вакуума, наиболее соответствующим для нее материалом является листовое железо толщиной, допускающей плотную сварку швов. Необходимая прочность ее (предупреждение смятия), в случае надобности, может быть обеспечена при помощи ребер жесткости из углового железа. Напорная труба в схеме 3 допускает более широкий выбор материала.

Помимо конструктивных задач, минимальная длина труб по всем трем схемам должна удовлетворять требованиям проверочных расчетов в отношении фильтрации воды из напорной камеры в отводящий канал.

Диаметр водоотводящих труб для ГЭС без подводной части здания, согласно формуле 4, должен определяться с таким расчетом, чтобы потеря напора на участке трубы, добавленном с целью ее удлинения, не превышала величины, равной

$$\Delta\xi \cdot H_{бр.}$$

В соответствии с этим условием минимальный предел диаметра удлиненной всасывающей трубы, по формуле Дарси, определяется уравнением:

$$d_{мин.} = \left( \frac{0,083 \cdot \lambda \cdot l \cdot Q^2}{\Delta\xi \cdot H_{бр.}} \right)^{0,5} \dots \dots (5)$$

где  $\lambda=0,025$ —коэффициент гидравлического трения в трубе большого диаметра.

Принятый диаметр трубы должен превысить его минимальное значение; с другой стороны, он может быть меньше так называемого экономичного диаметра, соответствующего минимальному значению функции:

$$S_1 + S_2 = f(d),$$



где  $S_1$ —сумма годовых расходов на ремонт трубопровода отчислений на его амортизацию,

$S_2$ —стоимость потерянной энергии в год.

По проектным данным Узбексельэлектро можно считать в среднем

$$S_1 = \alpha \cdot p \cdot d,$$

где  $\alpha=0,05$ —коэффициент отчислений на амортизацию и ремонт трубопровода,

$p=800$  руб.—стоимость 1 пог. м трубы с укладкой на место, отнесенная к диаметру в 1 м,

$d$ —диаметр трубы.

$$S_2 = \Delta N \cdot \eta_{агр} \cdot T \cdot e_{эл},$$

где  $\Delta N$ —гидравлическая потеря мощности на 1 пог. м трубопровода,

$\eta=0,65$ —полный коэффициент полезного действия гидроэлектрического агрегата,

$e_{эл}=0,4$  руб/кВт—стоимость вырабатываемой электроэнергии,

$T=3000$ —число часов работы гидроагрегата в год.

Гидравлическая потеря мощности (в киловаттах) на 1 пог. м трубопровода равна:

$$\Delta N = 9,8 \cdot Q \cdot 0,083 \cdot \lambda Q^2 \cdot d^{-5}.$$

Следовательно, производная функция  $S_1 + S_2$  по  $d$  равна:

$$\frac{d(S_1 + S_2)}{dd} = \alpha p - 5 \cdot 0,815 \cdot \lambda \cdot Q^3 \cdot d^{-6} \cdot \eta_{агр} \cdot T \cdot e_{эл},$$

откуда экономический диаметр трубопровода получается равным:

$$d_{эк} = \left( \frac{5 \cdot 0,815 \cdot \lambda \cdot \eta_{агр} \cdot T \cdot e_{эл}}{\alpha \cdot p} \right)^{1/6} \cdot \sqrt{Q} \quad \dots \quad (6)$$

или после подстановки указанных выше средних цифровых значений элементов:

$$d_{эл} = 1,1 \cdot \sqrt{Q} \quad \dots \quad (7)$$

Таким образом, диаметр водоотводящих труб гидроэлектростанции без подводной части здания должен быть в следующих пределах:

$$1,1 \cdot \sqrt{Q} > d > d_{мин} \dots \dots \dots (8)$$

Во всех рассмотренных схемах рационализации малых гидроэлектростанций удлинение всасывающей трубы не ухудшает работы гидротурбины в отношении ее коэффициента полезного действия и кавитации, не создает новых источников потерь энергии в общем энергетическом балансе гидросиловой установки, кроме небольшой потери при трении в удлиненной части трубы. В то же время с удлинением горизонтальной части всасывающей трубы появляется возможность расположить станционное здание в стороне от отводящего канала, в результате чего:

- 1) не требуется вся подводная часть станционного узла;
- 2) уменьшается глубина заложения фундамента машинного здания;
- 3) уменьшается количество земляных работ по выемке котлована под здание станции;
- 4) отпадает необходимость в водоотливе при производстве работ, и становятся ненужными ограждающие перемычки;
- 5) становятся ненужными шандоры с низовой стороны (отпадает необходимость строить мостик и бычки с пазами для шандоров).

Все эти моменты приводят к значительному сокращению сроков строительных работ, к уменьшению расхода материалов и снижению стоимости станции на сумму, значительно превосходящую повышение стоимости гидротурбины и всасывающей трубы.

Приведенные теоретические обоснования и ориентировочные расчеты показывают, что гидросиловые установки предлагаемого типа в различных вариантах заслуживают внимания и могут быть рекомендованы для внедрения в качестве рациональных типов гидроэлектростанций.

Очередной задачей проектных организаций является разработка технических проектов гидроэлектростанций для конкретных объектов с целью производственной проверки предложений, а также уточнения методов расчета и конструирования гидросиловых установок без подводной части здания. В задачи дальнейшей теоретической разработки схем этих станций, с целью составления типовых проектов, входит определение области применения их по напорам и расходам воды на основании исследования гидравлических режимов турбин и уточненных технико-экономических расчетов.

Помимо рассмотренных, возможны и другие схемы рационализации малых гидроэлектростанций, основанные

на иных принципах. В частности, отказавшись от ременной передачи, можно достигнуть значительного сокращения кубатуры машинного помещения. Это возможно при известном сочетании напоров и мощностей, при котором допустимо присоединение электрического генератора типа СГ\* непосредственно к валу горизонтальной турбины с числом оборотов, например, 1000 в минуту. Ориентировочные расчеты показывают возможность осуществления этого, начиная с напора даже в 4—5 м.

#### IV. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВСАСЫВАЮЩЕЙ ТРУБЫ.

Одной из основных задач при проектировании вытянутой всасывающей трубы для малой гидроэлектростанции без подводной части здания является определение максимального снижения давления во всасывающей трубе, происходящего вследствие гидравлического удара при регулировании открытия турбины.

Время возвращения волны при гидравлическом ударе в трубопроводе равно:

$$t = \frac{2l}{c} \approx \frac{l}{500},$$

где  $l$  — длина трубы (в метрах),

$c \approx 1000$  — скорость распространения звука в воде (с учетом упругости стенок стального трубопровода),

$t$  — время (с секундах).

Эта формула показывает, что для труб длиной меньше 50 м время возвращения волны удара исчисляется сотыми долями секунды. Следовательно, в удлиненной всасывающей трубе, длина которой всегда меньше 50 м, не должно быть прямого удара, так как закрытие направляющего аппарата турбины происходит значительно медленнее, особенно при ручном регулировании. Таким образом, расчет вытянутой всасывающей трубы для малой гидроэлектростанции без подводной части здания надо производить на сложный удар, который всегда бывает меньше прямого.

---

\* Наиболее распространенный тип электрического генератора на колхозных гидроэлектростанциях.

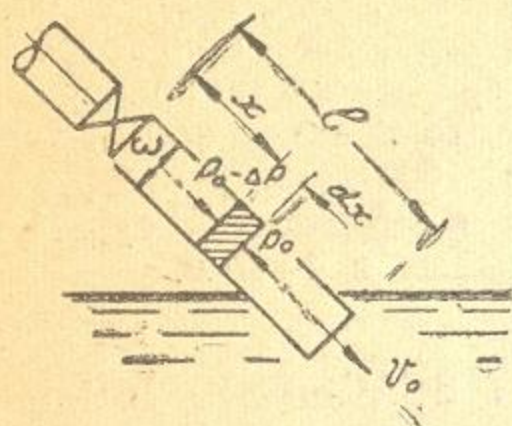


Рис. 8. Схема распространения прямого удара в водоотводящей трубе при внезапном закрытии направляющего аппарата.

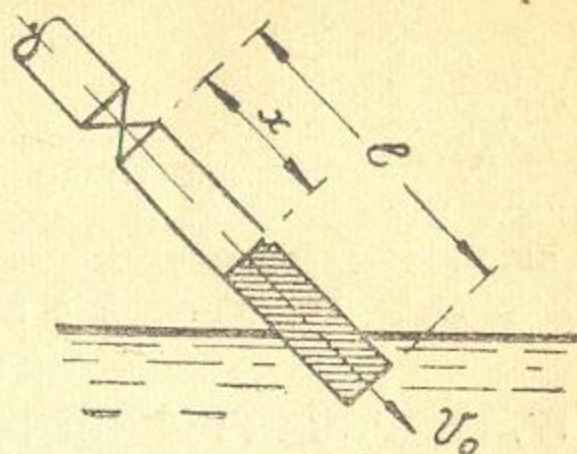


Рис. 9. Схема распространения сложного удара в водоотводящей трубе при постепенном закрытии направляющего аппарата.

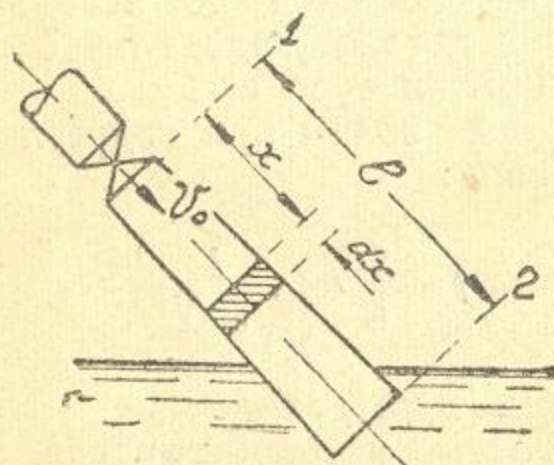


Рис. 10. Распространение сложного удара в конической трубе.

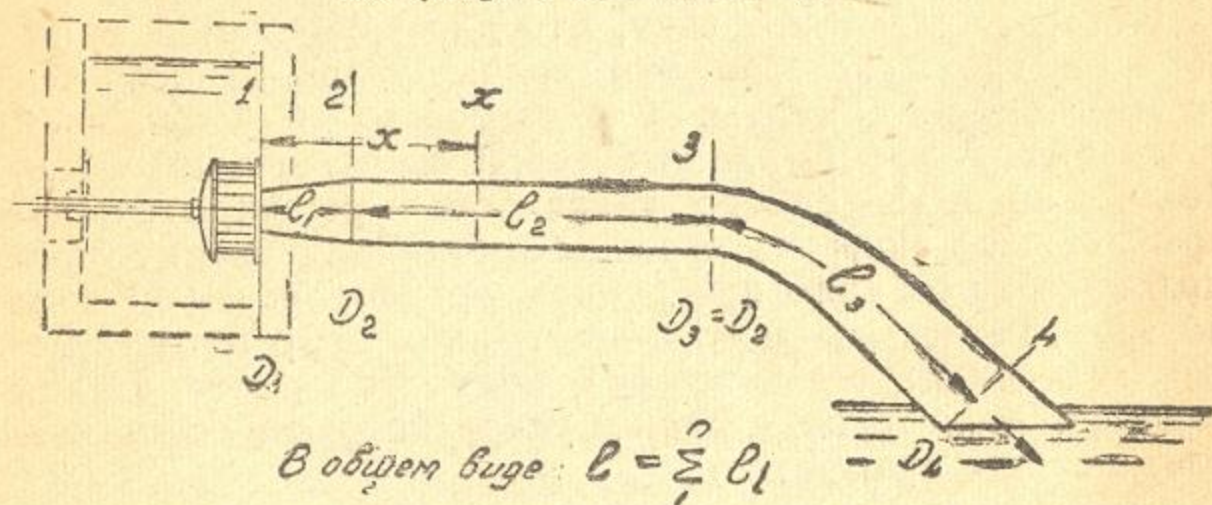


Рис. 11. Водоотводящая труба, составленная из цилиндрических и конических звеньев.

Наиболее опасным является снижение давления, возникающее в результате удара при полном закрытии направляющего аппарата турбины, работавшей до этого при полном его открытии. В этом случае изменение скорости движения воды во всасывающей трубе достигает своего максимального значения, равного полной величине этой скорости.

Ниже приводим известные приближенные формулы сложного гидравлического удара в трубе постоянного диаметра (формула Мишо) и в конической расходящейся трубе (формула Шапова) и на основании их — общую формулу (17) для расчета вытянутой всасывающей трубы переменного сечения.

### 1. Трубы постоянного диаметра\*.

а) Прямой удар.

Время закрытия трубы:

$$T \leq \frac{2l}{C} \text{ и } V_T = 0.$$

По теореме количества движения и импульса сил в соответствии с рис. 8, получаем:

$$\omega \Delta p \cdot dt = \rho \cdot V_0 \cdot dx \cdot \omega,$$

где  $\omega$  — площадь поперечного сечения трубы,

$V_0$  — начальная скорость (при  $t = 0$ )

$V_T$  — конечная скорость (при  $t = T$ ),

$\rho$  — плотность жидкости,

$\Delta p$  — понижение давления при ударе.

Имея в виду, что  $\frac{dx}{dt} = C$  — скорость распространения ударной волны, находим:

$$\Delta p = \rho \cdot C \cdot V_0 \dots \text{ формула Жуковского (9).}$$

Полученное значение  $\Delta p$  относится к любому сечению ( $x$ ) трубы и не зависит от ее длины.

\* См. проф. И. И. Агроскин — „Гидравлика“ 1944 г., стр. 132—136.

б) Сложный удар.

Время закрытия трубы:

$$T > \frac{2l}{C} \text{ и } V_T = 0.$$

В этом случае максимальное снижение давления в произвольно взятом сечении ( $x$ ) трубы на рис. 9 будет в момент

$$t = \frac{2(l-x)}{C},$$

когда скорость в трубе еще не равна нулю.

Снижение давления при этом будет равно:

$$\Delta p_x = \rho \cdot C (V_0 - V_t),$$

где  $V_t = f(t)$  — скорость, существовавшая в момент  $t$ .

Для определения этой скорости надо задаться законом закрытия направляющего аппарата турбины по времени. Наиболее простое решение задачи достигается путем предположения, что скорость воды в трубе изменяется на равные величины в равные промежутки времени. При этом, как показывают точные исследования Альеви, вычисленный удар оказывается несколько больше действительного\*, т. е. расчет, основанный на таком предположении, создает некоторый запас надежности.

Принимая линейный закон изменения скорости по времени, получаем:

$$V = V_0 \left(1 - \frac{t}{T}\right),$$

откуда

$$V_t = V_0 \left[1 - \frac{2(l-x)}{C \cdot T}\right]$$

$$\text{и } \Delta p_x = \rho \cdot C \left[ V_0 - V_0 + \frac{2(l-x)V_0}{C \cdot T} \right] = \frac{2\rho(l-x)V_0}{T}$$

или

$$\frac{\Delta p_x}{\gamma} = \Delta H_x = \frac{2(l-x)V_0}{g \cdot T} \dots \dots \dots (10)$$

\* См. проф. Н. М. Шапов — Турбинное оборудование гидро-станций\*, 1941 г.

Таким образом, в этом случае снижение давления при ударе изменяется по длине трубы и имеет максимальное значение при  $x = 0$ :

$$\Delta H_{\text{макс}} = \frac{2lV_0}{gt} \dots \dots \text{формула Мишо (11).}$$

Формула 10 показывает, что при сложном ударе в сечении ( $x$ ) трубы возникает явление, подобное отрыву массы жидкости, отмеченной штриховкой на рис. 9.

В общем случае формула Мишо применима при выполнении, согласно Маркетти, следующего условия:

$$\Delta H_{\text{макс}} \leq 2,2 \cdot H.$$

Для всасывающей трубы надо, очевидно, к правой части уравнения Маркетти подставить высоту всасывания ( $H_{\text{вс}}$ ).

## 2. Коническая расширяющаяся труба.

Рассматривается только сложный удар. Время закрытия трубы:

$$T > \frac{2l}{C} \text{ и } V_T = 0.$$

На основании формулы Мишо, максимальное снижение давления в начале трубы (сечение 1 на рис. 10) в общем виде равно:

$$\Delta H_1 = \frac{2}{gT} \int_0^l V_x \cdot dx \dots \dots \dots (12)$$

где  $V_x = V_1 \cdot \frac{\omega_1}{\omega_x} = V_1 \left( \frac{D_1}{D_x} \right)^2$ .

Для трубы с постоянным углом конуса:

$$D_x = D_1 + (D_2 - D_1) \frac{x}{l}$$

и

$$D_x^2 = D_1^2 + 2D_1(D_2 - D_1) \frac{x}{l} + (D_2 - D_1)^2 \left( \frac{x}{l} \right)^2$$

Подставив значения  $D_x^2$  в выражение для  $V_x$  и последнюю в уравнение 12, получим:

$$\Delta H_1 = \frac{2V_1 D_1^2}{gT} \int_0^l \frac{dx}{D_1^2 + 2D_1(D_2 - D_1) \frac{x}{l} + (D_2 - D_1)^2 \left(\frac{x}{l}\right)^2}$$

Последний интеграл приводится к виду:

$$\int \frac{dx}{a + 2bx + cx^2},$$

где  $a = D_1^2$ ;  $b = D_1(D_2 - D_1) \frac{1}{l}$ ;  $c = \left(\frac{D_2 - D_1}{l}\right)^2$

При этом  $ac = \left[\frac{D_1(D_2 - D_1)}{l}\right]^2 = b^2$ .

Следовательно,

$$\begin{aligned} \int \frac{dx}{a + 2bx + cx^2} &= \frac{1}{b + cx} + C = \\ &= \frac{1}{\frac{D_1(D_2 - D_1)}{l} + \frac{(D_2 - D_1)^2}{l} \cdot x} + C = \\ &= \frac{l}{D_1(D_2 - D_1) + (D_2 - D_1)^2 \frac{x}{l}} + C \end{aligned}$$

Таким образом, переходя к определенному интегралу с пределами от 0 до  $l$ , получаем максимальное снижение давления в начале расширяющейся конической всасывающей трубы в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Delta H_1 &= \frac{2lV_1 D_1^2}{gT} \left[ \frac{-1}{D_1(D_2 - D_1) + (D_2 - D_1)^2 \frac{x}{l}} \right]_0^l = \\ &= \frac{2lV_1 D_1^2}{gT} \left[ -\frac{1}{D_1(D_2 - D_1) + (D_2 - D_1)^2} + \frac{1}{D_1(D_2 - D_1)} \right] = \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 &= \frac{2lV_1D_1^2}{gT} \cdot \frac{D_1(D_2 - D_1) + (D_2 - D_1)^2 - D_1(D_2 - D_1)}{D_1(D_2 - D_1)[D_1(D_2 - D_1) + (D_2 - D_1)^2]} = \\
 &= \frac{2lV_1D_1}{gT} \cdot \frac{D_2 - D_1}{D_1(D_2 - D_1) + (D_2 - D_1)^2} = \\
 &= \frac{2lV_1D_1}{gT} \cdot \frac{1}{D_1 + D_2 - D_1},
 \end{aligned}$$

Откуда

$$\Delta H_1 = \frac{2lV_1}{gT} \cdot \frac{D_1}{D_2} \dots \dots \dots (13)$$

или

$$\Delta H_1 = \frac{2lV_1}{gT} \sqrt{\frac{\omega_1}{\omega_2}} \dots \dots \dots \text{Формула Щапова (14)}$$

где  $\omega = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ .

При  $D_2 = D_1$  последние две формулы (13 и 14) превращаются в формулу Мишо (11).

### 3. Всасывающая труба, состоящая из цилиндрических и конических участков.

Максимальное снижение давления в сечении (1) всасывающей трубы, изображенной на рис. 11, при полном закрытии турбины в течение времени  $T > \frac{2l}{C}$ , в общем виде равно:

$$\Delta H_1 = \frac{2}{gT} \int_0^l V_x \cdot dx,$$

причем полная длина трубы  $l = \sum_1^n li$ .

Представляя общий интеграл в виде суммы частных интегралов по отдельным участкам трубы, получим:

$$\Delta H_1 = \frac{2}{gT} \sum_1^n \left( \int_0^{li} V_x \cdot dx \right) \dots \dots \dots (15)$$

На основании формулы 13 частный интеграл в общем виде равен:

$$\int_0^H V_x \cdot dx = l_i V_i \frac{D_1}{D_{i+1} + 1},$$

где  $V_i = V_1 \left(\frac{D_1}{D_i}\right)^2$ ,

что дает после подстановки:

$$\int_0^H V_x \cdot dx = l_i V_1 \frac{D_1^2}{D_1 \cdot D_{i+1}} \dots \dots \dots (16)$$

Произведя подстановку значения частного интеграла в общем виде из формулы 16 в формулу 15, получаем в общем виде следующую формулу для расчета гидравлического удара в удлиненной всасывающей трубе переменного сечения.

$$\Delta H_{\text{макс}} = \frac{2V_1}{gT} \sum_1^n \left( l_i \frac{D_1^2}{D_1 \cdot D_{i+1}} \right) \dots \dots \dots (17)$$

В частном случае для наиболее типичной удлиненной всасывающей трубы, изображенной на рис. 11, эта формула принимает следующее выражение:

$$\Delta H_{\text{макс}} = \frac{2V_1}{gT} \left( l_1 \frac{D_1}{D_2} + l_2 \frac{D_1^2}{D_2^2} + l_3 \frac{D_1^2}{D_2 \cdot D_3} \right) \dots \dots (18)$$

В формулах 17 и 18 множитель, заключенный в скобки, представляет собой полную длину всасывающей трубы, приведенную к ее начальному диаметру.

Согласно отмеченному выше условию Маркетти, формулы 17 и 18 применимы в пределах значений:

$$\Delta H_{\text{макс}} < 2,2 \cdot H_{\text{вс}} \dots \dots \dots (19)$$

Таким образом, формулы 17 и 19, а также частная формула 18 являются основой для приближенного расчета вытянутой всасывающей трубы на гидравлический

удар. Кроме того, всасывающая труба должна быть проверена на потерю напора в ней по обычным формулам гидравлических сопротивлений, а высота всасывания — на кавитацию. При проверке на кавитацию рекомендуем не учитывать потери напора во всасывающей трубе, а отнести их в запас надежности, а геометрическую высоту всасывания для турбины с горизонтальным валом считать от верхней точки ее выходного отверстия.

---

## СОДЕРЖАНИЕ

I. О строительстве малых гидроэлектростанций на каналах ирригационных систем . . . . .	3
II. Задачи рационализации малых гидроэлектростанций . . . . .	5
III. Возможности удешевления строительства гидроэлектростанций . . . . .	8
IV. Гидравлический расчет всасывающей трубы . . . . .	19
1) Трубы постоянного диаметра . . . . .	21
2) Коническая расширяющаяся труба . . . . .	23
3) Всасывающая труба, состоящая из цилиндрических и конических участков . . . . .	25

Редактор *Д. Я. Федоров*  
Техредактор *С. Губайдуллин*

---

Сдано в набор 21/V 1948 г. Разрешено к печати 25/IX 1948 г. Р 06492.  
Тираж 3000. Договор № 369-48 г. Формат бумаги  $51 \times 84 \frac{1}{16}$ . Печ. л. 1,75.  
Уч.-изд. л. 1,6. 36720 знаков в 1 печ. л. Цена 1 р.

---

Бухара. Типография „Бухара хакикати“. 1948. Заказ № 1800