

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Соловьев Дмитрий Александрович  
Должность: ректор ФГБОУ ВО Вавиловский университет  
Дата подписания: 26.03.2026 10:48:44  
Уникальный программный ключ:  
528682d78e671e566ab07f01fa1ba2172f735a12

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное**  
**учреждение**  
**высшего образования**  
**«Саратовский государственный университет генетики, био-**  
**технологии и инженерии имени Н.И.Вавилова»**

**Гидроузлы комплексного назначения. Строительство и реконструк-**  
**ция гидроузлов**  
**методические указания по выполнению курсовой работы**  
**для обучающихся 4 курса**  
**Направление подготовки**  
**20.03.02 Природообустройство и водопользование**  
**Направленность (профиль)**  
**Инженерная защита территорий и сооружений**

**Саратов 2024**

УДК 624 131  
ББК 38.621  
М 69

М69 Гидроузлы комплексного назначения. Строительство и реконструкция гидроузлов: методические указания по выполнению курсовой работы для обучающихся 4 курса направление подготовки 20.03.02 Природообустройство и водопользование / Сост.: О.В. Михеева // ФГБОУ ВО «Вавиловский университет». – Саратов, 2024 – 31с.

Методические указания по выполнению курсовой работы по дисциплине «Гидроузлы комплексного назначения. Строительство и реконструкция гидроузлов» составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины и предназначены для студентов направления подготовки 20.03.02 Природообустройство и водопользование. Методические указания по выполнению курсовой работы содержат теоретические основы проектирования и расчета основных элементов сооружений инженерной защиты, направлены на формирование у обучающихся навыков расчета и проектирования основных сооружений инженерной защиты территорий от неблагоприятных природных явлений

УДК 624.131  
ББК 38.621

© Михеева О.В., 2024  
© ФГБОУ ВО «Вавиловский университет»

## **ВВЕДЕНИЕ**

Значимость гидротехнических сооружений в любом водохозяйственном комплексе чрезвычайно велика начиная от плотины, водозаборного сооружения, водовыпуска и других сооружений, они обеспечивают нормальное функционирование любой мелиоративной системы.

Для успешной разработки водохозяйственного объекта инженер должен уметь анализировать исходные условия (рельеф, гидрология, геология и др.), знать конструкции сооружений, возможности применения и технологию их возведения, владеть методами расчета выбранных конструкций, прогнозировать последствия, вызванные их строительством.

В методическом пособии в краткой форме изложены некоторые узкоспециальные вопросы теории, приведены необходимые справочные данные и примеры расчетов, наиболее часто встречающиеся в практике проектирования гидротехнических сооружений.

### **1. Компоновка гидроузла**

Гидротехнические узлы (ГТУ) устраивают на реках, балках и других водотоках с целью создания водохранилищ, предназначенных для орошения и обводнения земель, помимо этих целей водохранилище может быть использовано так же для рыболовства, водоснабжения, культурно-бытовых, противоэрозионных и других нужд.

Водоохранилища для орошения и обводнения земель являются водохранилищами сезонного регулирования.

Полезный объем этих водохранилищ в каждом случае обосновывается экономически и технически с учетом их хозяйственного назначения, а также размеров ущерба от затопления и подтопления территорий и объектов.

Компоновка гидроузла, состав и тип входящих в него сооружений зависят от допустимой форсировки уровня воды в водохранилище (превышение ФПУ над НПУ).

Рекомендуется принимать, по возможности наименьшее значение этого превышения, так как при этом уменьшается площади затопления и подтопления; уменьшается высота плотины.

Компоновка гидроузла производится в увязке с существующими или проектируемыми дорогами в районе его расположения. По гребню плотины предусмотреть устройство автомобильной дороги, назначение и класс которой должны быть в каждом частном случае обоснованы с учетом требований (9) СНиП 2.05.02-85, условий эксплуатации сооружений гидроузла.

### **2. Основные расчетные положения.**

#### **Нагрузки и воздействия**

Гидротехнические сооружения, их конструкции и основания следует рассчитывать по методу предельных состояний.

Расчеты необходимо производить по двум группам предельных состояний:

*по первой* (полная непригодность сооружений, их конструкций и оснований к эксплуатации) – расчеты общей прочности и устойчивости системы сооружение – основание, общей фильтрационной прочности оснований и грунтовых сооружений, прочности отдельных элементов сооружений, разрушение которых приводит к прекращению эксплуатации сооружений; расчеты перемещения конструкций, от которых зависит прочность или устойчивость сооружений в целом, и др.;

*по второй* (непригодность к нормальной эксплуатации) – расчеты оснований на местную прочность; расчеты по ограничению перемещений и деформаций, образованию или раскрытию трещин и строительных швов, нарушению местной фильтрационной прочности отдельных элементов сооружений, не рассматриваемой по предельным состояниям первой группы.

При расчетах гидротехнических сооружений, их конструкций и оснований надлежит соблюдать следующее условие, обеспечивающее недопущение наступления предельных состояний:

$$\gamma_{lc} F \leq R \gamma_c$$

где  $\gamma_{lc}$  – коэффициент сочетаний нагрузок, принимаемый равным:

при расчетах по предельным состояниям первой группы – для основного сочетания нагрузок и воздействий в период нормальной эксплуатации  
1,0

то же для периода строительства и ремонта  
0,96

для особого сочетания нагрузок и воздействий  
0,9

при расчетах по предельным состояниям второй группы  
1,0

$F$  – расчетное значение обобщенного силового воздействия (сила, момент, напряжение), деформации или другого параметра, по которому производится оценка предельного состояния;

$R$  – расчетное значение обобщенной несущей способности, деформации или другого параметра, устанавливаемого нормами проектирования;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы, учитывающий тип сооружения, конструкции или основания, вид материала, приближенность расчетных схем, вид предельного состояния и другие факторы и устанавливаемый действующими нормативными документами на проектирование отдельных видов гидротехнических сооружений, их конструкций и оснований;

$\gamma_n$  – коэффициент надежности по ответственности (назначению) сооружения, учитывающий капитальность и значимость последствий при наступлении тех или иных предельных состояний;

при расчетах по предельным состояниям первой группы принимается для класса сооружения:

I.....	1,25
II.....	1,2
III.....	1,15

#### IV.....1,10

при расчетах по предельным состояниям второй группы  $\gamma_n$  следует принимать равным 1,0

при расчете устойчивости естественных склонов  $\gamma_n$  следует принимать как для класса рядом расположенного проектируемого сооружения.

Значение коэффициентов надежности по материалам  $\gamma_m$  и грунтам  $\gamma_g$  применяемых для определения расчетных сопротивлений материалов и характеристик грунтов, устанавливаются по СНиП на проектирование отдельных видов гидротехнических сооружений, их конструкций и оснований.

В некоторых случаях расчетные сопротивления материалов и грунтов определяются после статистической обработки результатов экспериментальных исследований.

Расчетное значение нагрузки определяется умножением нормативного значения нагрузки на соответствующий коэффициент надежности по нагрузке  $\gamma_f$ .

Нормативные значения нагрузок следует определить по СНиП на проектирование отдельных видов гидротехнических сооружений, их конструкций и оснований.

Значение коэффициентов надежности по нагрузке  $\gamma_f$  при расчетах по предельным состояниям первой группы следует принимать в соответствии с обязательным приложением 3.

Расчеты гидротехнических сооружений, их конструкций и оснований по предельным состояниям второй группы следует производить с коэффициентом надежности по нагрузке  $\gamma_f$ , а также с коэффициентом надежности по материалам  $\gamma_m$ , и грунтам  $\gamma_g$ , равными 1,0, за исключением случаев, которые установлены в СНиП на проектирование отдельных видов гидротехнических сооружений, их конструкций и оснований.

Методы расчета гидротехнических сооружений устанавливаются соответствующими нормативными документами по проектированию отдельных видов конструкций и сооружений.

Расчет конструкций и сооружений в необходимых случаях следует производить с учетом нелинейных и неупругих деформаций, влияния трещин и неоднородности материалов.

Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения подразделяются на постоянные и временные (длительные, кратковременные и особые).

Гидротехнические сооружения следует рассчитывать на основные и особые сочетания нагрузок и воздействий.

Основные сочетания включают постоянные, временные длительные и кратковременные нагрузки воздействия. Особое сочетания включают постоянные, временные длительные, кратковременные и одну (одно) из особых нагрузок и воздействий.

Нагрузки и воздействия необходимо принимать в наиболее неблагоприятных, но реально для рассматриваемого расчетного случая сочетания отдельно для строительного и эксплуатационного периодов и расчетного ремонтного случая.

При проектировании постоянных речных гидротехнических сооружений расчетные максимальные расходы воды надлежит принимать исходя из ежегодной вероятности превышения (обеспеченности), устанавливаемой в зависимости от класса сооружений для двух расчетных случаев – основного и поверочного – по табл. 4.1. При этом расчетные гидрологические характеристики следует определять по СНиП 2.01.14-83.

Таблица 4.1

Расчетные случаи	Ежегодная вероятность превышения $P$ , %, расчетных максимальных расходов воды в зависимости от класса сооружения			
	I	II	III	IV
Основной	0,1	1,0	3,0	5,0
Поверочный	0,01*	0,1	0,5	1,0

\* С учетом гарантированной поправки  $\Delta Q$ , %, в соответствии со СНиП 2.01.14-83.

Расчетный расход воды, подлежащий пропуску в процессе эксплуатации через постоянные водопропускные сооружения гидроузла, следует определять исходя из расчетного максимального расхода, полученного в соответствии с учетом трансформации его проектируемыми для данного гидротехнического сооружения или действующими водохранилищами и изменения условий формирования стока, вызванного хозяйственной деятельностью в бассейне реки.

Пропуск расчетного расхода воды для основного расчетного случая должен обеспечиваться, как правило при нормальном подпорном уровне (НПУ) верхнего бьефа через:

эксплуатационные водосбросные устройства при полном открытии;  
все гидротурбины ГЭС;

другие водопропускные сооружения при нормальном режиме их эксплуатации.

Пропуск расходов воды основного расчетного случая, в том числе через нерегулируемые водосбросы (без затворов), допускается осуществлять и при уровнях верхнего бьефа, отличающихся от НПУ. Нагрузки и воздействия, соответствующие уровням выше НПУ, следует учитывать в составе основного сочетания нагрузок и воздействий, а для сооружений, предназначенных для борьбы с наводнениями, - при соответствующем обосновании в составе особого сочетания нагрузок и воздействий.

Пропуск расчетного расхода воды для поверочного расчетного случая надлежит обеспечить при наивысшем технически и экономически обоснованном форсированном подпорном уровне (ФГУ) всеми водопропускными сооружениями гидроузла, включая эксплуатационные водосбросы, гидротурбины

ГЭС, водозаборные сооружения оросительных систем и систем водоснабжения, судоходные шлюзы, рыбопропускные сооружения и резервные водосбросы. При этом, учитывая кратковременность прохождения пика паводка, допускаются:

- уменьшение выработки электроэнергии ГЭС;
- нарушение нормальной работы водозаборных сооружений, не приводящее к созданию аварийных ситуаций на объектах – потребителях воды;
- повреждение резервных водосбросов, не снижающее надежности основных сооружений;
- пропуск воды через водоводы замкнутого поперечного сечения при переменных режимах, не проводящий к разрушению водоводов;
- размыв русла и береговых склонов в нижнем бьефе гидроузла, не угрожающий разрушением основных сооружений, селитебных территорий и территорий предприятий, последствия которого могут быть устранены после пропуска паводка.

### 3. Расчет отметки гребня плотины

Очертания профиля плотины. Земляные насыпные плотины являются наиболее распространенным типом грунтовых плотин для гидроузлов с низкими и средними напорами и, как правило, имеют высоту не более 50-60 м. Они бывают чаще всего однородными, но встречаются и неоднородные плотины: с экранами, ядрами и диафрагмами. Очертания поперечного сечения плотины зависит от ее высоты, прочностных свойств грунтов в теле плотины, а также технологии ее воздействия. Поперечный профиль плотины определяется заложением верхового и низового откосов, наличием на откосах берм, отметкой и шириной гребня плотины.

При проектировании плотины, прежде всего, определяют *отметку гребня*, исходя из принимаемых в проекте отметок нормального и фиксированного уровней воды в водохранилище, а также исходя из расчетных значений элементов ветровых волн и конструктивных особенностей гребня плотины. Превышение отметки гребня плотины над расчетным статистическим уровнем воды в водохранилище определяется формулой

$$d = \Delta h + h_H + a,$$

где  $\Delta h$  – высота ветрового нагона волны;  $h_H$  – высота наката волны на откос;  $a$  – запас, принимаемый не менее 0,5 м.

Расчетные значения  $\Delta h$  и  $h_H$  определяют в соответствии с требованиями СНиП 2.06.04-82.

Расчеты по формуле следует проводить для двух расчетных случаев:

- 1) уровень воды на отметке НПУ или выше него (основное сочетание нагрузок и воздействий);
- 2) уровень воды на отметке ФПУ при пропуске максимального поверочного расхода воды (особое сочетание нагрузок и воздействий).

Расчетную скорость ветра в первом случае принимают 1 % - ной вероятности превышения, наблюдаемую в течение года, а во втором – 50 % - ной вероятности превышения, наблюдаемую во время форсировки уровня. При

определении элементов ветровых волн и ветрового нагона согласно СНиП 2.06.04 – 82 следует принимать вероятность превышения шторма для сооружений I, II класса 2 % и III, IV – 4 %.

В качестве расчетной отметки гребня плотины принимают большую из отметок

$$\begin{aligned} Z_{сп} &= Z_{нпу} + d_{нпу}; \\ Z_{сп} &= Z_{фпу} + d_{фпу}, \end{aligned}$$

где  $Z_{нпу}$  и  $Z_{фпу}$  - отметки нормального и форсированного подпорных уровней.

Высоту ветрового нагона определяют по зависимости

$$\Delta h = K_{\epsilon} W^2 D \cos \alpha_{\epsilon} / g(H + \Delta h),$$

где  $K_{\epsilon}$  - коэффициент, зависящий от скорости ветра;  $W$  – расчетная скорость ветра на высоте 10 м над уровнем воды, м/с;  $D$  – длина разгона ветровой волны, м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $H$  – условная расчетная глубина воды в водохранилище;  $\alpha_{\epsilon}$  – угол продольной осью водоема и направлением господствующих ветров, град.

Таблица 5.1

$W,$ $м/с$	20	30	40	50
$K_{\epsilon}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$

Расчет по формуле проводят по известным значениям  $W$ ,  $D$ ,  $H$  и  $\alpha_{\epsilon}$ , первоначально полагая значение  $\Delta h$ , стоящее в знаменателе, равным нулю ввиду его малости по сравнению с величиной  $H$ .

Высоту наката ветровой волны для  $j$ -й вероятности превышения расчетного шторма вычисляют по формуле

$$h_{H_j} = h_{1\%} K_{\Delta} K_{нп} K_c K_{\beta} K_{нз} K_{Hj}$$

Высоту волны 1 % - ной вероятности превышения, определяют в такой последовательности.

1. Вычисляют безразмерные комплексы

$$gt/W \text{ и } gD/W^2$$

где  $t$  – продолжительность действия ветра, принимаемая при отсутствии фактических данных  $6 \text{ ч} = 21600 \text{ с}$ .

2. По графику для каждого из найденных комплексов определяют значения относительных параметров  $g\tau/W$  и  $gh/W$ .

3. Из найденных двух пар значений параметров выбирают наименьшие и из них устанавливают среднюю высоту волны  $h$  и средний период волны  $\tau$ .

4. Вычисляют среднюю длину волны

$$\lambda = g\tau^2 / (2\pi).$$

5. Высоту волны 1 %- ной вероятности превышения, определяют по формуле

$$h_1 \% = h K_j,$$

где  $K_j$  – коэффициент, устанавливаемый по графику при 1 %- ной вероятности превышения в зависимости от значения безразмерного комплекса  $gD \setminus W^2$ .

Коэффициенты  $K_{\Delta}$  и  $K_{nn}$  зависят от типа и относительной шероховатости крепления откоса ( $r/h_1$  %), их принимают по таблице.

Характерный размер шероховатости  $r$  следует принимать равным среднему диаметру камня при каменной наброске или равным среднему размеру бетонных, железобетонных блоков. При креплении откоса каменной наброской средний диаметр камня предварительно принимают в пределах 0,2 ... 0,3 м. После выполнения расчета крепления откоса при необходимости значения  $K_{\Delta}$  и  $K_{nn}$  уточняют по принятому расчетному размеру камня.

Значения коэффициента  $K_c$  определяют по таблице в зависимости от скорости ветра и коэффициента заложения откоса  $m = ctg \varphi$ , где  $\varphi$  - угол наклона откоса к горизонту.

### 5.2 Значение коэффициентов $K_{\Delta}$ и $K_{nn}$

Конструкция крепления откоса	$r/h_1$ %	$K_{\Delta}$	$K_{nn}$
Бетонные или железобетонные плиты Гравийно-галечниковые, каменные или бетонные (железобетонные) блоки	-	1,00	0,90
	Менее 0,002	1,00	0,90
	0,005 ... 0,010	0,95	0,85
	0,02	0,90	0,80
	0,05	0,80	0,70
	0,10	0,75	0,60
	Более 0,2	0,70	0,50

### 5.3 Значения коэффициента $K_c$

Скорость ветра, м/с	Заложение откоса			
	0,4	0,4...2	3...5	5
$\geq 20$	1,3	1,4	1,5	1,6
$\leq 10$	1,1	1,1	1,1	1,2

5.4 Коэффициент  $K_{\beta}$  принимается в зависимости от угла  $\beta$  подхода фронта волны к плотине:

$\beta$ , град	0	1	2	3	4	5	6
		0	0	0	0	0	0

$K$	1	0,	0,	0,	0,	0,	0,
$\beta$		98	96	92	87	82	75

Значение коэффициента  $K_{нз}$  определяют по графикам. Для пользования ими предварительно устанавливают значение пологости волны  $\lambda/h_1$  %.

5.5 Коэффициент  $K_{Hj}$  учитывает вероятность превышения  $j$  (%) по накату.

$j$ , %	0,	1	2	5	1	3	5
	1				0	0	0
$K$ $Hj$	1,	1,	0,	0,	0,	0,	0,
	1	0	96	91	86	76	68

Расчет высоты наката по формуле выполняют предполагая, что перед плотиной имеется глубоководная зона (глубина воды  $H > 0,5\lambda$ ) и при  $H \geq 2h_1$  %. После вычисления  $\lambda$  по формуле необходимо проверить правильность предположения. При глубине перед сооружением  $H < 2h_1$  % коэффициент  $K_{нз}$  необходимо принимать для значений пологости волны, указанных в скобках.

При устройстве на гребне плотины водонепроницаемого и устойчивого парапета, отметку его верха назначают с превышением над расчетным уровнем на величину  $d$ . Устройство парапета дает возможность гребень плотины выполнять ниже, что сокращает объем тела плотины. При этом отметка гребня плотины не должна быть ниже наивысшего уровня воды при максимальном поверочном расходе воды и в тоже время должна быть выше НПУ не менее чем на 0,3 м и не ниже отметки ФПУ.

Значением  $d$  определяется проектная отметка гребня. С целью предотвратить опускание гребня плотины ниже проектной отметки в период эксплуатации в результате длительных осадок тела сооружения необходимо предусмотреть строительный запас, равный ожидаемой эксплуатационной осадке.

#### 4. Конструирование профиля земляной плотины

Ширина гребня плотины назначается с учетом производства работ, эксплуатационных требований и транспортной схемы. При отсутствии проезда по гребню его ширина должна быть не менее 3 м, а для высоких плотин – не менее 6 м. При наличии автодороги, или железнодорожного пути, или того или другого одновременно ширина плотины по гребню назначается в зависимости от габаритов дорог, определяемых сопутствующими нормативными документами. Конструкция гребня плотины определяется конструкциями прокладываемых по гребню дорог и пешеходных путей, ливнестоками, кабельными траншеями и т. п. Если тело плотины или ядро сложены глинистыми грунтами, то гребень покрывают защитным слоем из песчаного гравийного грунта, толщина которого должна превосходить глубину промерзания грунта в данном районе, это предотвращает морозное пучение глинистого грунта и тем самым защищает от разрушения дорожные перекрытия.

Заложения откосов плотины определяется расчетами устойчивости и зависит от конструкции плотины, расчетных характеристик прочности грунтов тела плотины, условий эксплуатации существующих плотин. В качестве аналогов следует использовать прогрессивные конструкции, созданные в сходных природных условиях из грунтов, близких по своим показателям (зерновому составу, прочностным и деформационным характеристикам) к грунтам, используемым в проектируемом сооружении. В соответствии с накопленным опытом в настоящее время для земляных насыпных плотин из песчаных и глинистых грунтов на предварительных стадиях проектирования могут быть рекомендованы следующие заложения откосов: для плотин высотой 5 -15 м – верховой откос 2-3, низовой откос 1,5-2,5; для плотин высотой 15-50 м – верховой откос 3-4, низовой откос 2,5-4,0; для плотин выше 50 м – верховой откос 4,0-5,0, низовой откос 4-4,5. Более пологие верховые откосы имеют место при необходимости пригрузки длинных понуров или при устройстве экрана из грунта с низкими прочностными характеристиками. Пологий низовой откос получается при необходимости пригрузки основания для обеспечения общей устойчивости плотины. При наличии в основании слабых грунтов откосы плотины могут быть более пологими, чем это указано выше.

На откосах плотины могут быть устроены бермы через 15-20 м шириной не менее 1,0 м для осмотра и ремонта откосов плотины. Более широкие бермы устраивают для служебных проездов, прокладки автомобильных и железнодорожных путей, для укладки специальных трубопроводов и т. п. Для отвода атмосферных вод в бермах предусматривают кюветы или лотки. Бермы также устраивают в местах сопряжения тела плотины с дренажным банкетом или перемычками, включаемыми в профиль плотины

#### 5.6 Коэффициенты заложения откосов земляных насыпных плотин

Типы плотин	Заложения откосов при высоте плотины, м					
	до 5		от 5 до 10		от 10 до 15	
	верхового	низового	верхового	низового	верхового	низового
Однородные без дренажа:						
глинистые грунты	2,00	1,75	2,50	2,00	3,00	2,25
песчаные грунты	2,50	2,00	2,75	2,25	3,00	2,25
Однородные с дренажем:						
глинистые грунты	2,00	1,50	2,50	1,75	3,00	2,00
песчаные грунты	2,50	1,75	2,75	2,00	3,00	2,00
Песчаные с суглинистым экраном без дренажа	2,25	2,00	2,50	2,25	3,00	2,50
Песчаные с суглинистым ядром без дренажа	3,00	2,00	3,00	2,00	3,25	2,50

#### 5.7 Основные параметры поперечного профиля автомобильных дорог

Категория дороги	Ширина, м		
	проезжей части (А)	обочин (Б)	земляного полотна
II	7.5	3,75	15
III	7.0	2.50	12
IV	6,0	2.00	10
V	4,5	1.75	8

## 6. Фильтрационные расчеты

Фильтрационные расчеты производят с целью:

- определение положения депрессионной кривой,
- установление значений градиентов и скоростей фильтрационного потока
- определения фильтрационного расхода.

В случае необходимости перечисленные параметры определяют не только в теле плотины, но и в ее основании и берегах – в зоне движения обходного фильтрационного потока.

Для проведения фильтрационных расчетов предварительно необходимо установить расчетный поперечный профиль сооружения, тип и положение дренажного устройства, коэффициенты фильтрации в отдельных элементах тела плотины  $k$  и  $t$  и ее основание.

В большинстве случаев фильтрационные расчеты носят вспомогательный характер и используются при расчетах устойчивости откосов плотины, при расчетах фильтрационной прочности грунтов тела плотины, основания и берегов, а также для обоснования наиболее рациональных размеров конструктивных элементов плотины (упорных призм, противофильтрационных и дренажных устройств). Кроме того, фильтрационные расчеты позволяют установить значения потерь воды из водохранилища на фильтрацию и в случае необходимости наметить те или иные мероприятия для их снижения.

### 6.1 Расчет фильтрации через однородную земляную плотину

Расчет фильтрации через однородную земляную плотину на водонепроницаемом основании без дренажа и при отсутствии воды в НБ.

При отсутствии воды в нижнем бьефе расчетные уровни имеют вид:

$$\frac{a_T}{R_T} = \frac{H_{nl} - d_0 - h}{m_1} 2,3 \lg \frac{H_{nl}}{H_{nl} - h};$$

$$\frac{g_T}{R_T} = \frac{h^2 - a_0^2}{2S};$$

$$\frac{g_T}{R_T} = \frac{a_0}{m_2};$$

$$S = b_{nl} + m_2(H_{nl} - a_0).$$

Приравниваем правые части уравнений находим:

$$h = \sqrt{\frac{2a_0S}{m_2} + a_0^2}.$$

Подставляя выражение S в это уравнение получаем:

$$h = \sqrt{\frac{2a_0}{m_2} [b + m_2(H - a_0)] + a_0^2}.$$

Обозначим правую часть через D получим  $h=D$ .

Тогда получим: 
$$\frac{g_T}{R_T} = \frac{H_{nl} - d_0 - D}{m_1} 2,3 \lg \frac{H_{nl}}{H_{nl} - D}$$

Вводим сокращенное обозначение:

$$2,3 \lg \frac{H_{nl}}{H_{nl} - D} = E, \text{ тогда } \frac{g_T}{R_T} = \frac{H_{nl} - d_0 - D}{m_1} E$$

$$\frac{a_0}{m_2} = \frac{(H_{nl} - d_0 - D)E}{m_1} \quad \text{или} \quad \frac{m_1}{m_2} a_0 = (H_{nl} - d_0 - D)E$$

Обозначаем левую часть  $\frac{m_1}{m_2} a_0 = F(a_0)$ , а правую часть

$$(H_{nl} - d_0 - D)E = F_2(a_0).$$

Задаваясь значениями  $a_0$ , решаем уравнения, добиваясь равенства

$$F_1(a_0) = F_2(a_0).$$

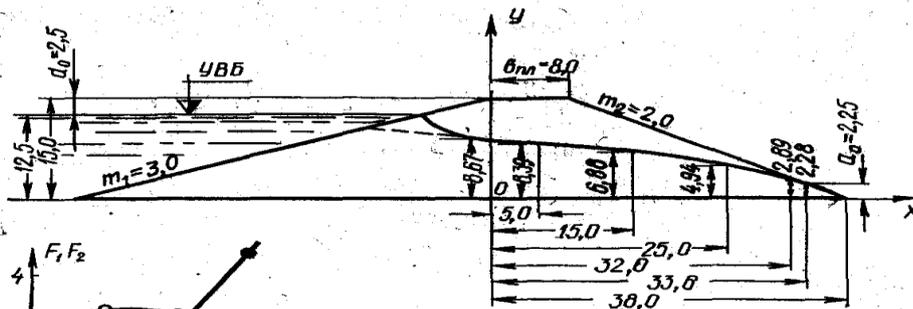
Ординату депрессионной кривой определяем по уравнению:

$$y^2 = h^2 - \frac{2g_T}{R_T} x.$$

Удельный фильтрационный расход равен:

$$g_T = \frac{R_T \cdot a_0}{m_2}.$$

Построив депрессионную кривую, видим, что кривая выходит на низовой откос на величину, поэтому необходимо в теле плотины назначить противофильтрационное устройство. Расчет выполняется по программе «sharko 035» на компьютере.



Расчетная схема фильтрации через однородную земляную плотину на водонепроницаемом основании, без дренажа и при отсутствии воды в нижнем бьефе.

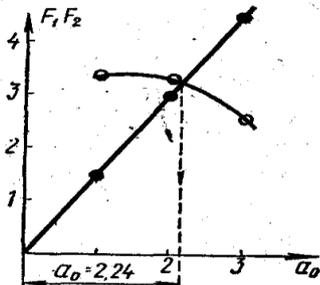


График для определения  $\alpha_0$ .

### 6.1 Расчет фильтрации через однородную земляную плотину с ядром и дренажом на водонепроницаемом основании при отсутствии воды в нижнем бьефе

В этом случае расчет сводится к построению кривой депрессии за ядром и определению фильтрационного расхода. Определяется глубина фильтрационного потока за ядром по уравнению.

$$h = \sqrt{T^2 + \frac{H_1^2 + 2H_1T}{1 + \frac{k_T}{k_я}} - T}$$

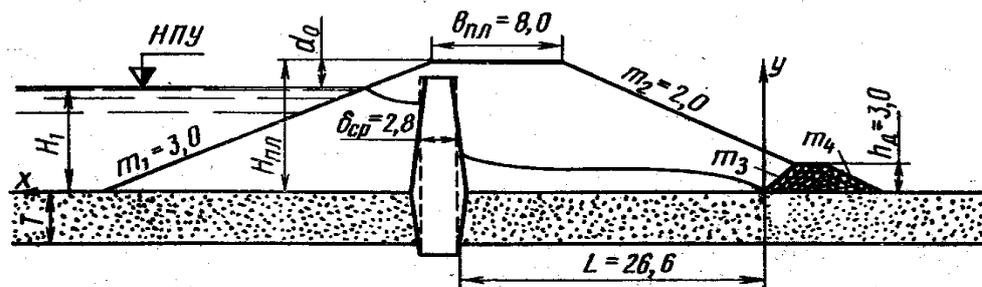
где  $H_1$  – расчетная глубина воды перед плотиной;  $T$  – глубина водонепроницаемого слоя основания.

Зная величину  $h$ , удельный фильтрационный расход вычисляют по уравнению

$$q_m = k_m \frac{(h+T)^2 - T^2}{2L} \text{ м}^2/\text{сут на 1 м.}$$

Кривая депрессия строится по уравнению

$$y = h \sqrt{\frac{x}{L}}$$



Расчетная схема фильтрации через земляную плотину с ядром и дренажем на водопроницаемом основании при отсутствии воды в нижнем бьефе.

### 6.1 Расчет фильтрации через однородную земляную плотину на водопроницаемом основании при отсутствии воды в нижнем бьефе с экраном, без дренажа

Расчетные формулы по Н.Н. Павловскому и Е.А. Замарину будут иметь такой вид:

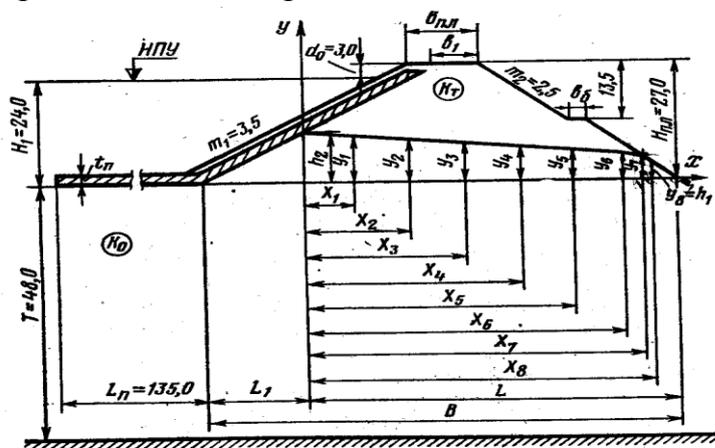
$$\frac{q}{k} = \frac{H_1^2 - h_0 - z^2}{2\delta_{ch}n \sin \theta}$$

$$h = \frac{L}{m_2} - \sqrt{\frac{L^2}{m} - h_i^2}$$

$$\frac{q}{k} = \frac{h_e^2 - h_1^2}{2(L - m_2 h_1)}$$

где  $n = \frac{k_m}{k_s}$  - отношение коэффициента фильтрации грунта тела плотины

к коэффициенту фильтрации грунта экрана;  $z = \delta_{cp} \cos \theta$  - проекция средней толщины экрана на вертикаль;  $\delta_{ch} = 0.5(\delta_e + \delta_n)$  - средняя толщина экрана;  $\theta$  - угол наклона экрана к основанию плотины;  $h_e$  - глубина фильтрационного потока непосредственно за экраном.



Расчетная схема фильтрации через земляную плотину с экраном и по-нуром без дренажа на водопроницаемом основании при отсутствии воды в нижнем бьефе.

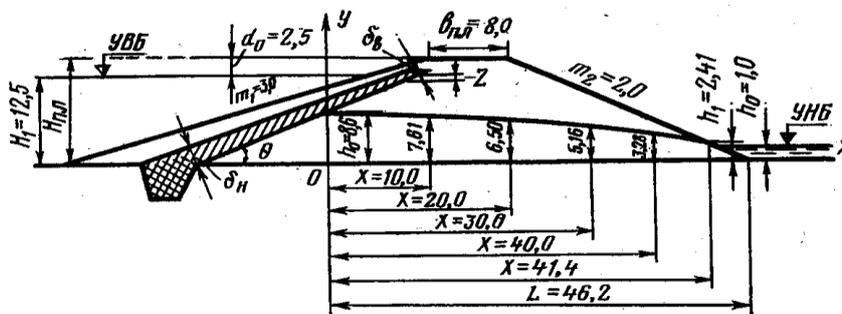
### 6.3 Расчет фильтрации через однородную земляную плотину на водопроницаемом основании с экраном, без дренажа при наличии воды в нижнем бьефе

При наличии воды в нижнем бьефе расчетные уравнения для плотины с экраном имеют вид:

$$\frac{q}{k} = \frac{H_1^2 - h_e^2 - z^2}{2\delta_{cp} n \sin \theta}$$

$$h_1 - h_0 = \frac{L}{m_2} - \sqrt{\frac{L}{m_2^2} - (h_e - h_0)^2}$$

$$\frac{q}{k} = \frac{h_e^2 - h_1^2}{2(L - m_2 h_1)}$$



6.4 Расчетная схема фильтрации через земляную плотину с экраном на водопроницаемом основании без дренажа при наличии воды в нижнем бьефе.

## 7. Расчет устойчивости откосов

Статистические расчеты плотины включают проверку устойчивости верхнего и низового откосов, а также экрана и его защитного слоя. Ниже приведены основные положения расчета устойчивости откосов плотины.

При проверке устойчивости низового откоса плотины, согласно СНиП 02.06.05-84, необходимо рассматривать следующие случаи:

А/ первый расчетный случай (основной): в верхнем бьефе нормальный подпорный уровень, в теле плотины - устанавливается фильтрация: при наличии воды в нижнем бьефе глубину ее принимают максимально возможной при НПУ, но не более  $0,2H$ , где  $H$  – высота откоса,

Б/ второй расчетный случай (основной) при открытых водосборах (без затворов): подпорный уровень нижнего бьефа определяется максимальным расходом, относимым к основным сочетаниям нагрузок и воздействий,

С/ третий расчетный случай (особый): в верхнем бьефе – сформированный подпорный уровень воды, в нижнем бьефе глубину воды принимают максимальной, соответствующей ФПУ.

При проверке устойчивости верхнего откоса в качестве основной расчетной принимают схему, когда наблюдается максимально возможное снижение уровня воды в водохранилище от НПУ с наибольшей возможной

скоростью, при этом учитывают фильтрационные силы неустановившейся фильтрации. Рассматривают также расчетный случай строительного периода, когда водохранилище еще не наполнено, уровень воды в верхнем бьефе находится на самой низкой отметке, но не ниже  $0,2H$ , где  $H$  – высота откоса, а уровень грунтовой воды соответствует установившемуся. В качестве особого случая при расчете устойчивости верхнего откоса учитывают условия, возникающие при максимально возможном снижении уровня воды в водохранилище от ФПУ с наибольшей скоростью при учете фильтрационных сил неустановившейся фильтрации.

Расчеты устойчивости откосов грунтовых плотин всех классов следует выполнять для кругло цилиндрических поверхностей сдвига. При наличии в основании или теле плотины ослабленных зон (прослойки грунта с более низкими прочными свойствами, при оценке устойчивости экрана или защитного слоя и т.д.) расчеты выполняют для произвольных поверхностей сдвига.

При использовании метода круглоцилиндрических поверхностей сдвига выполняют следующие основные операции.

1. Строят область нахождения центров поверхностей сдвига.
2. Проводят круглоцилиндрические поверхности сдвига.
3. Вычисляют значения коэффициентов устойчивости откоса для множества поверхностей сдвига по формуле

$$K_{уст} = R / F,$$

где  $R$ ,  $F$ —равнодействующие моментов сил сопротивления сдвигу и активных сил относительно оси поверхности сдвига.

4. Определяют минимальное значение коэффициента устойчивости  $K_{min}$
5. Делают вывод об устойчивости откоса и правильности принятого его заложения. Откос считается устойчивым, если

$$K_{min} > K_n K_c / K_M,$$

где  $K_n$  — коэффициент надежности по ответственности сооружения;  $K_c$  — коэффициент, зависящий от сочетания нагрузок и равный для основного сочетания—1,0; для особого сочетания — 0,9; для строительного периода — 0,95;  $K_M$ —коэффициент, равный 0,95 при упрощенных методах расчета и 1,0 — при удовлетворяющих условиях равновесия.

Найденное значение не должно превышать  $K_n K_c / K_M$  более чем на 10%, если это не обусловлено особенностями сооружения.

Для построения области нахождения центров поверхностей сдвига предложено несколько методов. Один из наиболее простых методов В. В. Фандеева, в котором рекомендуется центры круглоцилиндрических поверхностей сдвига располагать в криволинейном четырехугольнике, образованном следующими линиями, проведенными из середины откоса: вертикалью и прямой

под углом  $85^\circ$  к откосу, а также двумя дугами радиусов определяемые в зависимости от заложения откоса.

Область центров поверхностей сдвига можно также строить по рекомендациям В. В. Аристовского или М. М. Гришина.

Поверхность сдвига на поперечном профиле плотины представляет собой дугу окружности радиуса  $R$ , проведенную таким образом, чтобы она пе-

ресекала гребень плотины и захватывала часть основания. При этом граница кривой сдвига на поверхности основания обычно не выходит за пределы  $2H_{пл}$  во внешнюю сторону от подошвы откоса. При несвязных грунтах основания и тела плотины кривую сдвига рекомендуется проводить вблизи подошвы откоса.

Значения коэффициента устойчивости откоса для некоторой кривой сдвига вычисляют для 1 м длины плотины в такой последовательности.

1. Область, ограниченную кривой сдвига и внешним очертанием плотины (массив обрушения), разбивают вертикальными прямыми на отсеки шириной  $b$ . При расчете «вручную» удобно величину  $b$  принимать равной  $0,1R$ , центр нулевого отсека размещать под центром кривой сдвига, а остальные отсеки нумеровать с положительными знаками при расположении их вверх по откосу и с отрицательными — вниз к подошве плотины, считая от нулевого.

2. Для каждого отсека вычисляют  $\sin \alpha$  и  $\cos \alpha$ , где  $\alpha$  — угол наклона подошвы отсека к горизонту. При  $b = 0,1R$  значение  $\sin \alpha = 0,1 T$ , где  $T$  — порядковый номер отсека с учетом его знака;

3. Определяют средние высоты составных частей каждого отсека, имеющих различные плотности:  $h_1$  — слоя грунта тела плотины при естественной влажности;  $h_2$  — слоя грунта тела плотины при насыщении водой;  $h_3$  — слоя грунта основания при насыщении водой;  $h_0$  — слоя воды. В качестве средних высот принимают высоты частей, замеренные по чертежу в середине отсека. При наличии по краям массива обрушения неполных отсеков их эквивалентная средняя высота  $h = \omega/b$ , где  $\omega$  — площадь неполного отсека, определяемая графически.

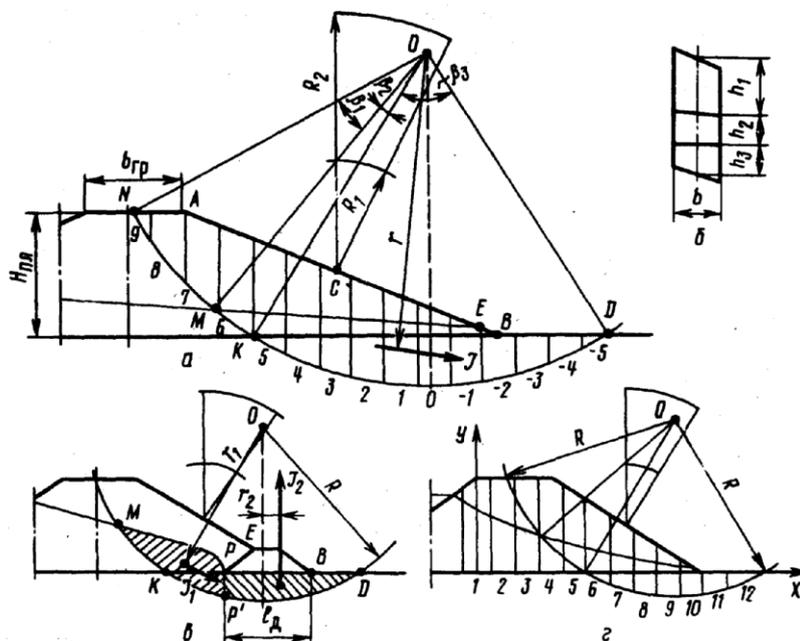


Рис.7.1 Расчетные схемы устойчивости низового откоса:  
 а — при отсутствии дренажа; б — составные части отсека; в — при наличии дренажа; г — для расчета с применением ЭВМ.

4. Вычисляют плотность грунта каждого слоя по формулам

$$\gamma_1 = (1-n)\gamma_{\text{с.м.}}k$$

$$\gamma_2 = (1-n)(\gamma_{\text{с.м.}} - \gamma_0),$$

$$\gamma_3 = (1-n)(\gamma_{\text{с.о.}} - \gamma_0)$$

где  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  - плотность грунта тела плотины при естественной влажности и при насыщении его водой, а также грунта основания при насыщении водой;  $n$  – пористость грунта;  $k$  – коэффициент, зависящий от влажности грунта (при влажности, равной 12...18%,  $k=1,12...1,18$ );  $\gamma_0$  – плотность воды;  $\gamma_{\text{г.т.}}, \gamma_{\text{г.о.}}$  - удельная плотность частиц грунта тела и основания плотины.

Физико-механические характеристики грунтов следует устанавливать по данным натурных исследований, а при их отсутствии для предварительных расчетов — принимать по таблице 7.1.

5. Определяют приведенные высоты отсеков

$$h_{np} = h_1 + h_2\gamma_2/\gamma_1 + h_3\gamma_3/\gamma_1 + h_0\gamma_0/\gamma_1$$

где  $h_0$  – глубина слоя воды над отсеком.

7.1 Осредненные значения физико-механических характеристик грунтов

Грунт	Удельная плотность частиц, т/м <sup>3</sup>	Пористость	Удельное сцепление грунта, кПа		Угол внутреннего трения, град.	
			естественной влажности	насыщенного водой	естественной влажности	насыщенного водой
Глина	2,74	0,35...0,5 0	3,0...6,0	2,0...3,5	20...26	12...16
Суглинок	2,71	0,35...0,4 5	2,0...4,0	1,5...3,	21...27	15...20
Супесь	2,70	0,30...0,4 5	0,5...1,3	0,3...0,5	25...30	20...23
Песок:						
пылеватый	2,70	0,38...0,4 4	0,2...0,6	0,2...0,6	26...32	24...30
мелкий	2,66	0,38...0,4 3	0,2...0,4	0,2...0,4	28...32	27...32
средний	2,66	0,35...0,4 1	0,1...0,2	0,1...0,2	35...38	34...37
крупный и гравелистый	2,66	0,35...0,4 1	0,1	0,1	38...40	35...38

Устанавливают силу трения, возникающую на подошве всего массива обрушения, суммируя соответствующие силы по отсекам,

$$F = b\gamma_1 \sum h_{np} \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

Угол внутреннего трения  $\varphi$  зависит от вида грунта и его влажности в зоне кривой сдвига, при отсутствии фактических данных его принимают по таблице. Значение  $\varphi$  будет постоянным на протяжении каждой составной части кривой сдвига, проходящей в грунте тела плотины выше кривой депрессии —  $\varphi_1$ ; в грунте тела плотины ниже кривой депрессии —  $\varphi_2$ ; в основании плотины —  $\varphi_3$ .

Подобным же образом вычисляют касательную составляющую веса массива обрушения

$$T = b\gamma_1 \sum h_{np} \sin \alpha$$

Силу сцепления, возникающую на подошве массива обрушения, определяют по формуле

$$S = c_1 l_1 + c_2 l_2 + c_3 l_3,$$

где  $c_1, c_2, c_3$  — удельные сцепления грунта тела плотины при естественной влажности и при насыщении водой, а также грунта основания, насыщенного водой  $l_1, l_2, l_3$  — длины дуг кривой сдвига, соответствующих удельным сцеплениям  $c_1, c_2, c_3$ , вычисляемые по формуле

$$l = 2\pi R\beta / 360^\circ,$$

где  $\beta$  — центральный угол (град) круглоцилиндрической поверхности сдвига, опирающийся на дугу  $l$ .

Фильтрационную силу учитывают как объемную. При отсутствии дренажа

$$\Phi = \Omega I \gamma_0$$

где  $\Omega = b \sum (h_2 + h_3)$  - площадь фигуры МЕВДК;  $I = \Delta y / \Delta x$  - средний градиент фильтрационного потока;  $\Delta y$  - падение депрессионной кривой в пределах массива обрушения;  $\Delta x$  - расстояние, на котором произошло падение депрессионной кривой на  $\Delta y$ .

Для дренированных плотин определяют две составляющие фильтрационной силы. Первую из них  $\Phi_1$  вычисляют по формуле выше, только площадь  $\Omega$  в этом случае равна площади фигуры МРРК, то есть до дренажа. Вторую составляющую, имеющую вертикальное направление, приближенно можно найти следующим образом:

$$\Phi_2 = \Omega_2 I_2 \gamma_0 = \Omega_2 H_1 \gamma_0 / (B - l_0), \text{ где } \Omega_2 - \text{площадь фигуры РВДП}.$$

Вычисляют значение коэффициента устойчивости откоса

$$K_{ycm} = (F + S) / (T + \Phi_r / R),$$

где  $r$  — плечо фильтрационной силы, равное расстоянию от центра кривой сдвига до центра тяжести площади  $\Omega$ , которое измеряют по чертежу.

Для плотин с дренажем формула имеет вид

$$K_{ycm} = (F + S) / (T + \Phi_1 r_1 / R + \Phi_2 r_2 / R), \text{ где } r_1 \text{ и } r_2 - \text{плечи фильтрационных сил } \Phi_1 \text{ и } \Phi_2.$$

Значение коэффициента устойчивости откоса следует определять для десятков кривых сдвига, поэтому расчеты целесообразно выполнять на ЭВМ. Поиск кривой с минимальным значением осуществляют методом последовательных приближений. Для предварительно выбранных равномерно расположенных 10... 15 центров кривых сдвига определяют значения  $K_{уст}$ . В дальнейшем центры кривых сдвига назначают в окрестности центра с наименьшим из найденных значений. Данный процесс повторяют до нахождения центра с минимально возможным значением коэффициента устойчивости откоса. Характер рассмотренного процесса поиска свидетельствует о целесообразности диалогового режима функционирования ЭВМ.

При использовании ЭВМ для вычисления множества значений отвечающих различным кривым сдвига, удобно ввести постоянные оси координат.

Нумерация откосов при этом начинается от оси ординат. Угол наклона подошвы  $j$ -го отсека к горизонту определяют по формуле

$$\alpha_j = \arcsin[(x_c - (j-1)b)/R],$$

где  $x_c$  – абсцисса центра кривой сдвига.

Устойчивость откосов каменно-набросных плотин приближенно можно оценить по формуле:

$$K_{ycm} = tg \varphi / tg \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол откоса плотины;  $\varphi$  – средний угол внутреннего трения каменной наброски.

Расчет устойчивости откосов каменно-земляных плотин выполняют аналогично рассмотренному расчету откосов земляных плотин.

$$K_{ycm} = \frac{b\gamma_{ec} \sum h_{np} \cos \alpha tg \varphi + \sum cl}{b\gamma_{ec} \sum h_{np} \sin \alpha + \Omega I \frac{r}{R}}, \text{ где } K_{уст} = K_{min}$$

## **8. Общие положения проектирования водосбросных сооружений**

Водосбросные сооружения при глухих плотинах обеспечивают сброс паводковых вод. Они могут входить или не входить в состав напорного фронта гидроузла. До начала проектирования рекомендуется ознакомиться с имеющимися публикациями по проектированию и эксплуатации водосбросных сооружений. Среди большого количества опубликованных учебно-методических работ в качестве основных рекомендуется.

При проектировании водосбросных сооружений необходимо решить следующие задачи: в соответствии с классом водонапорного сооружения определить расчетную вероятность сброса расхода; гидрологическими и водохозяйственными расчетами установить значения расчетного сбросного расхода; наметить несколько конкурирующих вариантов водосбросных сооружений. Включающих разные типы сооружений и различные трассы водосбросного тракта; установить основные размеры сооружения по каждому из намеченных вариантов; определить местоположения и размеры отдельных сооружений с учетом рельефа местности и геологических условий; его конструирование; по каждому из выбранных вариантов выполнить уточняющие и окончательные проектные проработки, включая сметно-финансовые расчеты; по результатам технико-экономического сравнения вариантов выбрать основной вариант водосброса.

### **8.1 Расчетные расходы водосбросов.**

В соответствии с изменениями, внесенные Госстроем СССР в СНиП 2.06.01-86 при проектировании постоянных речных гидротехнических сооружений, расчетные максимальные расходы воды определяют по СНиП 2.01.14-83 с установлением их ежегодной вероятности превышения в зависимости от класса сооружений для основного и поверочного случаев согласно таблице.

Расчетный расход воды рекомендуется определять с учетом трансформации части объема паводка в водохранилище.

При определении размеров водосброса необходимо руководствоваться СНиП 2.06.01-81 с учетом изменений, внесенных в него Госстроем СССР. Тип, число и размеры поперечного сечения водосбросных сооружений следует выбирать исходя из пропуска расчетного расхода воды для основного случая.

При определении размеров водосброса учитывают, что пропуск расчетного расхода воды для основного расчетного случая должен быть обеспечен. Как правило, при нормальном подпорном уровне верхнего бьефа через эксплуатационные регулируемые водосбросы с порогом, размещенным ниже отметки НПУ; через все турбины ГЭС; через все другие водоспускные сооружения при нормальных условиях их эксплуатации.

Пропуск расхода при отметках уровней воды, отличных от НПУ, допускаются при соответствующем обосновании.

Поверочный случай предусматривает пропуск расходов всеми водопропускными и водозаборными сооружениями гидроузла. В том числе и резервными водосбросами при допустимом в особых условиях уровне воды. В этом случае допускается деформации русла и даже частичное разрушение отдельных частей вспомогательных сооружений без потери их общей устойчивости.

## 8.2 Выбор варианта водосброса.

Один из наиболее ответственных вопросов проектирования, вызывающих наибольшие затруднения, - выбор варианта из числа конкурирующих. Каждый из намечаемых вариантов должен основываться на учете природных, гидрологических и инженерно-геологических условий района строительства,

Таблица 8.1

Расчетные случаи	Классы сооружения			
	I	II	III	IV
Основной	0,1	1,0	3.0	5.0
Поверочный	0,01*	0.1	0.5	1.0

\* С учетом поправки по СНиП 2.01.14-83

а также эксплуатации проектируемых сооружений.

Оптимальный вариант может быть принят на основе технико-экономического сравнения различных вариантов. При технико-экономическом сопоставлении вариантов водосбросов необходимо учитывать стоимость не только собственно водосброса, но и примыкающей к нему части плотины. Для уменьшения стоимости водосбросных сооружений рекомендуется рассматривать возможность устройства в составе водохранилищных узлов резервных водосбросов с размывными грунтовыми вставками. Такие водосбросы повышают надежность работы сооружения при пропуске расходов

редкой повторяемости и одновременно снижают стоимость строительства и эксплуатации водосбросов.

При выборе варианта регулируемого или нерегулируемого водосброса рекомендуется учитывать следующее:

- нерегулируемые открытые водосбросы чаще всего экономически целесообразны при расходах менее 100...200 м<sup>3</sup>/с, устройстве плотин малой протяженности и сравнительно больших объемах трансформации паводкового расхода между отметками НПУ и ФПУ;

- автоматические водосбросы не требуют постоянного дежурства обслуживающего персонала, обеспечивающего работу подъемного оборудования затворов, что особенно важно в районах с внезапными и значительными паводками; такое дежурство трудно организовать на малых и удаленных от населенных мест объектах;

- регулируемые водосбросы позволяют поддерживать расчетный подпорный уровень воды в водохранилище и могут обеспечить сброс паводковых расходов без форсировки уровней, то есть без дополнительного затопления прилегающей территории; такие водосбросы на 10...15 % дешевле нерегулируемых;

- нерегулируемые водосбросы требуют устройства более высоких плотин, но могут иметь меньшие размеры в связи с уменьшением вследствие трансформации расчетных паводковых расходов.

**Выбор трассы водосбросного тракта.** Тип, конструкция, а в конечном итоге и стоимость водосброса зависят от положения трассы водосбросного тракта. При выборе трассы рекомендуется учитывать следующие соображения:

- ось водосбросного тракта целесообразно трассировать по берегам водотока и по возможности перпендикулярно горизонталям;

- трасс водосброса должна быть по возможности прямолинейной и иметь минимально возможную протяженность;

- в случае криволинейной трассы водосброса необходимо предусмотреть специальные конструктивные мероприятия. Обеспечивающие устойчивость сооружения на поворотах;

- в случае недостаточной прочности грунтов. Слагающих берега водотока, при соответствующем обосновании допускается трассировать водосбросы в пределах плеч или тела плотины;

- при трассировке водосбросного тракта предусматривают удаление его, а особенно входной части, от плотины во избежание нежелательного воздействия на нее потока; при этом необходимо обеспечить равномерный подход потока к отверстиям водосброса и безопасный для плотины отвод его в нижнем бьефе.

При проектировании даже одного типа водосброса рекомендуется рассматривать несколько возможных вариантов его размещения.

### **8.3 Конструкции водосбросных сооружений**

**Открытые водосбросы.** Среди водосбросных сооружений, устраиваемых при низконапорных грунтовых плотинах, широкое распространение по-

лучили открытые регулируемые и нерегулируемые водосбросы. Их отличает простота и конструктивные особенности, позволяющие максимально использовать условия местности и гидроузла в целом.

**Открытые регулируемые водосбросы.** Позволяют пропускать значительные расходы при малой форсировке уровней воды и водохранилище; срабатывать водохранилище в сравнительно малые промежутки времени; автоматизировать процесс пропуска паводковых и санитарных расходов.

Применение их ограничивается необходимостью постоянного присутствия на гидроузле обслуживающего персонала; недостаточном уровне надежности автоматизации управления их работой, опасностью заклинивание затворов при сейсмических воздействиях. При проектировании регулируемых водосбросов необходимо предусматривать сооружения по защите от льда и плавающих тел. При конструировании таких устройств рекомендуется использовать ТП 820-87. Варианты открытых регулируемых водосбросов на расчетные расходы  $20 \dots 50 \text{ м}^3/\text{с}$  при перепадах  $5 \dots 15 \text{ м}$ .

Сооружения состоят из входного оголовка уложенного на свайное или грунтовое основание и концевой площадки. Гашение энергии сбросного потока происходит в воронке размыва. Если нет условий для устройства консольного перепада. Применяют гасители в виде водобойных колодцев. При выборе варианта гасителей учитывают, что устройство их экономически обосновано при расходах более  $50 \text{ м}^3/\text{с}$  при прочных равных условиях. Сбросные расходы на таких сооружениях регулируют плоскими металлическими затворами. Оборудованными подъемниками с ручным или электрическим приводом

#### **8.4 Открытые нерегулируемые водосбросы**

Обеспечивают автоматический сброс расходов при повышении нормального подпорного уровня воды в водохранилище. В общем случае в состав таких водосбросов включают подводящий и отводящий каналы, головное и сопрягающее сооружения. Такие водосбросы экономичны, просты в устройстве и эксплуатации. Но требуют форсировки уровней в водохранилище. Для устранения указанного недостатка прибегают к созданию развитой водоприемной части. Что в некоторых случаях трудно осуществимо или требует значительных затрат. Имеющиеся конструктивные решения таких водосбросов в основном различаются по конструкции водоприемной части или входного оголовка. Выделяют сооружения с боковым и фронтальным забором воды. С криволинейными, полигональными, ковшовыми и траншейными входными оголовками. Наиболее эффективно применение таких водосбросов в водохранилищах малой ширины. Водосбросы с оголовками в виде полигональных водосливов перспективны в широких водохранилищах с мелководной поймой.

При небольших расходах и в условиях, допускающих воронки размыва в нижнем бьефе, сопряжение бьефов на большинстве действующих водосбросов осуществлено по типу отброшенной струи.

Добиться уменьшения высоты слоя форсировки можно, применения оголовки криволинейного очертания или полигональные водосливы. Стои-

мость строительства сооружений данных типов при одинаковых условиях примерно одинакова. Технические решения таких водосбросов разработаны Укргипроводхозом на расходы от 100 до 400 м<sup>3</sup>/с и перепады от 6 до 12 м.

Оголовки с полигональными и криволинейными водосливами могут быть расположены в любой части плотины, но лучший эффект достигается на водосбросах с выдвинутыми в водохранилище оголовками.

На водохранилищах с крутыми и высокими берегами, где недопустима значительная форсировка уровней, экономичны боковые траншейные водосбросы. Они работают в автоматическом режиме, обеспечивают точное регулирование уровней. Однако малые удельные расходы воды требуют создания протяженного водосливного фронта. В практике гидротехнического строительства получили распространение некоторые конструктивные решения траншейных оголовков.

Расчет траншейного водосброса. Это сооружение состоит из водослива с широким порогом или водослива практического профиля, водосбросной траншеи и отводного канала.

Порог водослива располагают на отметке НПУ вдоль берега водохранилища на расстоянии 20 — 40,0 м от плотины. Напор на пороге водослива принимают в пределах  $H = 0,75 \div 1,0$  м.

Гидравлический расчет траншейного водосброса сводится к определению длины водосливного порога  $L$  и построению кривой свободной поверхности воды по приближенному методу, предложенному проф. Е. А. Зама-риным. Расчет следует выполнять при пропуске расходов  $Q$ ;  $0,5 Q$  и  $0,25 Q$ .

Длину водосливного порога определяют по формуле неподтопленного или подтопленного водослива в зависимости от характера сопряжения потока в нижнем бьефе.

Если  $h_n \geq nH_0$ , то водослив подтопленный, если  $h_n \leq nH_0$  то водослив неподтопленный, где  $h_n$  — превышение уровня воды нижнего бьефа над порогом водослива, м;  $n$  — коэффициент подтопления, принимаемый от 0,75 до (0,83 ÷ 0,87);

При неподтопленном водосливе длину водосливного порога вычисляют по формуле

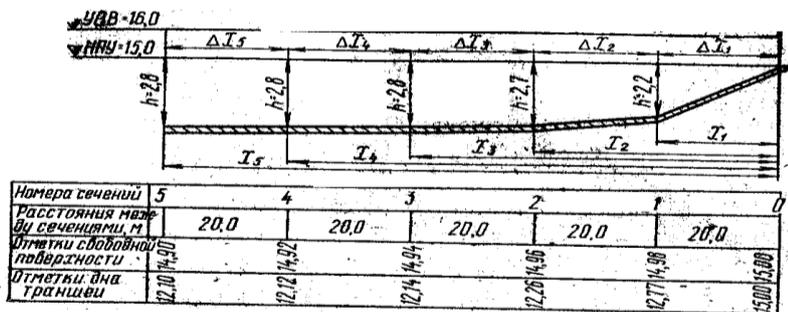
$$L = \frac{Q}{m\sqrt{2gH}^{3/2}},$$

где  $L$  — длина водосливного порога, м;  $Q$  — расход, сбрасываемый через траншею, м<sup>3</sup>/с;  $m$  — коэффициент расхода, принимаемый приближенно равным 0,36;  $H$  — напор на пороге водослива, м.

При подтопленном водосливе длину водосливного порога находят по формуле

$$L = \frac{Q}{\varphi h \sqrt{2gz}},$$

где  $\varphi$  — коэффициент скорости;  $h$  — глубина воды на пороге водослива в конце входного участка (глубина подтопления), м;  $z$  — разность уровней воды перед порогом и на пороге водослива, м.



### 8.1 Расчетная схема водосбросной траншеи.

Глубину воды можно принять  $h = H - z$ , более точно можно определить по методике, рекомендуемой «Техническими условиями и нормами проектирования гидротехнических Сооружений».

Разность уровней воды перед порогом и на пороге водослива можно найти из зависимости

$$v = \varphi \sqrt{2gz}$$

Глубину наполнения и средние уклоны на отдельных участках траншеи определяют, задаваясь Шириной траншеи по дну и средней скоростью течения воды.

### 8.5 Расчет водосброса.

На низконапорных гидроузлах закрытые водосбросы применяют в основном для пропуска расходов, не превышающих 50...100 м<sup>3</sup>/с. Среди таких водосбросов наиболее широко распространены конструкции сифонного, ковшового и шахтного типов. При проектировании водосбросов необходимо предусмотреть защиту от попадания в них плавающих тел.

Отличительные особенности водосбросов сифонного типа – незначительный подъем воды в водохранилище (0,5...0,8 м) над НПУ при сбросе максимальных расходов, что позволяет уменьшить площадь отчужденных земель под чащу водохранилища, а также высокая сборность сооружений (коэффициент сборности 56...63). Сооружение возводят из пяти типов унифицированных изделий. К недостатком конструкции сооружения относится трудность обеспечения высокой степени герметичности соединения напорных труб в реальных условиях строительства и эксплуатации, а также цикличность работы.

Основной элемент сифонного водосброса – трубопровод, запроектированный из звеньев железобетонных напорных труб. В зависимости от требуемой пропускной способности сооружения трубы укладывают в одну, две или три нити. Данный тип нарастающим паводком и небольшой аккумулялирующей емкостью водохранилища.

Среди закрытых нерегулируемых водосбросов, устраиваемых при низконапорных грунтовых плотинах, наиболее широкое распространение получили трубчатые водосбросы с ковшовым оголовком.

Сброс максимальных расходов происходит при превышении уровня верхнего бьефа (ФПУ) над отметкой порога оголовка (НПУ) для КВАТ-1 – 0,55 м. Для КВАТ-4 – 0,82 м.

В зависимости от условий размещения сооружений, расходов, слоя форсировки и числа водопроводов применяют ковши прямоугольного и криволинейного очертания. Периметр оголовка ковша, параметры труб и воронки размыва определяют гидравлическим расчетом.

Перспективны трубчатые бесковшовые водосбросы. Особенности конструкции водоприемника предохраняют сооружение от образования в его полости ледяных пробок, что повышает надежность работы сооружения.

Бесковшовый водосброс состоит из входного оголовка, воздушного гидравлического регулятора, водопроводящей части и выходного оголовка с зарядным клапаном. Сооружение работает в напорном режиме и выполнено из стальных труб диаметром до 1,4 м. Пропускная способность одной нитки сооружения до 16 м<sup>3</sup>/с при перепаде уровней до 15 м.

Гидравлический расчет сводится к определению ширины водослива, потерь напора в трубах и размеров водобойного колодца.

Ширину водослива, обеспечивающую нормальный режим работы сооружения, находят по формуле

$$b = \frac{Q}{\sigma_n m \sqrt{2g H_1^{3/2}}},$$

где  $\sigma_n$  – коэффициент подтопления,  $m$  – коэффициент расхода;  $H_1$  – напор на пороге водослива, м;

Коэффициент подтопления принимают в зависимости от отношения  $\frac{h_n}{H_0}$ , где  $h_n$  – высота подтопления, м;  $H_0$  – полный напор на пороге водослива с учетом скорости подхода, м.

Имея общую ширину, устанавливают ширину торцевой и боковых частей водослива. Ширина торцевой части должна быть равна или больше входного фронта трубы.

Задаваясь количеством труб и их размерами, определяют скорость  $v = \frac{Q}{\omega}$ ,

где  $\omega$  – площадь живого сечения потока в трубах, м<sup>2</sup>.

Полная потеря напора определяются по зависимости

$$h = \sum \xi \frac{v^2}{2g} = (\xi_{ex} + \xi_{вых} + \xi_{mp} + \dots) \frac{v^2}{2g},$$

где  $\xi_{ex}$  – коэффициент сопротивления при входе;  $\xi_{вых}$  – коэффициент сопротивления при выходе;  $\xi_{mp}$  – коэффициент сопротивления на трение по длине труб.

Коэффициент сопротивления при входе в трубу принимают при острых кромках  $\xi_{ex} = 0,5$ , при плавном входе 0,2, при весьма плавном входе 0,05.

Коэффициент сопротивления при входе с учетом скорости в трубе

$$\zeta_{ex} = \xi'_{ex} \left( \frac{v_{ex}}{v} \right)^2,$$

где  $v_{ex}$  – средняя скорость течения в сечении на входе, м/с;  $v$  – средняя скорость течения в данном сечении трубы, м/с.

Коэффициент сопротивления при выходе под уровень нижнего бьефа

$$Z_{вых} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2,$$

где  $\omega_1$  – площадь живого сечения потока в трубе, м<sup>2</sup>;  $\omega_2$  – площадь живого сечения потока в водобойном колодце при выходе, м<sup>2</sup>.

Коэффициент сопротивления на трение по длине труб равен:

- для труб  
круглого поперечного сечения

$$\zeta_{тр} = 2gl \frac{8gl}{C^2 d} = \frac{\lambda l}{d};$$

- для труб  
прямоугольного поперечного сечения

$$\zeta_{тр} = 2gl \frac{h^2}{R^{4/3}},$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления по длине в трубах,  $l$  – длина трубы, м;  $d$  – диаметр трубы, м.

Если полные потери напора в трубах примерно равны напору, то сечение труб достаточно для пропуска расчетного расхода.

Для гашения энергии потока в конце трубы устраивают водобойный колодец или водобойную стенку.

## 8.6 Расчет сифонного водосброса.

Сифонный водосброс относится к сооружениям автоматического действия. Водослив сифона располагают на отметке НПУ. Передняя часть трубы имеет расширенный вход и для предупреждения захвата воздуха заглубляется под уровень на 0,7 – 1,0 м.

В козырьке сифона на отметке НПУ делают воздушные отверстия. Чтобы в сифон не попадали плавающие тела, входное отверстие прикрывают грубой решеткой.

Для принудительного включения сифона (зарядка сифона) предусматривается труба (с задвижкой), через которую можно откачать воздух.

При истечении из сифона под постоянный уровень низшую отметку потолка выходного участка сифона располагают не более чем на 0,5 м и не менее чем 0,25 м под уровнем воды нижнего бьефа. При переменном уровне воды за сифоном необходимо устроить водобойный колодец, обеспечивающий затопление выходного отверстия сифона в тех же пределах, что указано выше.

Для пропуска больших расходов ставят несколько сифонов (батарея сифонов), у которых отметки водосливов разнятся на 5 - 10 см.

В гидравлическом расчете сифонного водосброса бывает два случая: 1) для заданного расхода выбирают тип сифона, определяют поперечные размеры трубы сифона, скорость и вакуум в сифоне; 2) при принятом типе сифона, количестве труб в батарее и поперечных размерах труб определяют расход, скорость и вакуум.

В первом и во втором случаях выполняют расчет сопряжения струи, выходящей из сифона, с нижним бьефом.

Расход сифона определяют по формуле

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_0},$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода сифона  $0,70 \div 0,85$ ;  $\omega$  – площадь выходного сечения трубы сифона,  $\text{м}^2$ ;  $H_0$  – полный напор, определяемый с учетом скорости подхода, м;  $H$  – напор, равный разности уровней воды перед входом и у выхода сифона, м;  $v_0$  – скорость воды при подходе к выходу сифона, м/с.

Коэффициент расхода определяют для двух случаев:

- при выпуске воды под уровень

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{k_m^2 + \sum \xi k_n^2}};$$

- при выпуске воды в атмосферу

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi k_n^2}},$$

где  $k_m = \frac{\omega}{\omega_k}$  - отношение площади выходного сечения к площади живого

сечения нижнего бьефа;  $k_n = \frac{\omega}{\omega_n}$  - отношение площади выходного сечения к площади рассматриваемого сечения;  $\sum \xi$  - сумма коэффициентов сопротивления местных потерь состоит из коэффициентов сопротивления во входном сечении, при изменении площади поперечного сечения сифона; на закруглениях; в выходном сечении (учитывается только при выходе струи воды из сифона под уровень нижнего бьефа) и др.

Скорость в выходном сечении при выпуске воды в атмосферу определяют по формуле

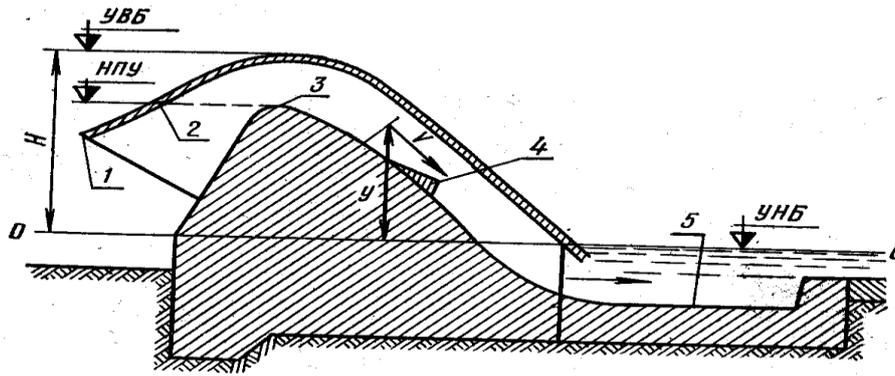
$$v = \sqrt{\frac{2gH_0}{1 + \sum \xi}}.$$

После вычисления расхода и скорости определяют вакуум в сифоне, который допускается не больше  $вак_{дон} \leq 8 \div 8,5$  м вод. Ст. Расчет ведем по уравнению Бернулли, составленному для какого-либо сечения относительно плоскости сравнений 0-0:

$$вак = \frac{p_a}{\gamma} - \frac{p}{\gamma} = y + \frac{v^2}{2g} (1 + \sum \xi) - H,$$

где  $p_a$  – атмосферное давление, м;  $p$  – давление в рассматриваемом сечении, м;  $y$  – расстояние от плоскости сравнения до центра рассматриваемого сечения, м;  $v$  – скорость в рассматриваемом сечении, м/с.

Если вакуум в сифоне получается больше допустимого, то необходимо уменьшить потери, то есть придать более плавное очертание поворотам сифона.



8.2 Расчетная схема сифонного водосброса. 1 – козырек; 2 – воздушное отверстие; 3 – гребень сифона; 4 – гусек; 5 – водобойный колодец.

### Список использованной литературы:

1. Гидротехнические сооружения: Учебник / Нестеров М.В., - 2-е изд., испр. и доп. - М.: НИЦ ИНФРА-М, Нов. знание, 2015. - 601 с.: 60x90 1/16. - (Высшее образование: Бакалавриат) ISBN 978-5-16-010306-8 - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/483208>
2. Сольский, С.В. Проектирование водохозяйственных систем: гидроузлы и водохранилища : учебное пособие / С.В. Сольский, С.Ю. Ладенко. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 280 с. — ISBN 978-5-8114-2298-2. — Текст : электронный // Электронно-библиотечная система «Лань» : [сайт]. — URL: <https://e.lanbook.com/book/95164> (дата обращения: 08.10.2019). — Режим доступа: для авториз. пользователей. <https://e.lanbook.com/reader/book/95164/#1>
3. Гидротехнические сооружения и рыбоводные пруды : учеб. пособие / М.В. Нестеров, И.М. Нестерова. — Минск : Новое знание ; М. : ИНФРА-М, 2017. — 682 с. : ил. — (Высшее образование: Бакалавриат). - Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/527500>
4. Гидротехнические сооружения : справочник проектировщика / Г. В. Железняков, Ю. А. Ибад-заде, П. Л. Иванов и др.; Под. ред. В. П. Недриги. - М. : Стройиздат, 1983. - 544 с.
5. Шарков, В.П. Сооружения гидроузлов сельскохозяйственного назначения, М.: МГУП, 2010-107с. ISBN 978-5-89231-322-3
6. Ляпичев Ю.П. Гидротехнические сооружения: Учеб. пособие. – М.: РУДН, 2008. – 302 стр.
7. Гидротехнические сооружения. Под ред. Рассказова Л.Н., М., Стройиздат, 2010, ч.1,2.
8. Попов, М.А. Инженерная защита окружающей среды. Часть 3. М.: МГУП, 2000
9. Попов, М.А. Инженерная защита окружающей среды. Часть 4. М.: МГУП, 2000
10. Варывдин, А.В. Надежность элементов водопропускных сооружений. [Текст]: учебное пособие/А.В. Варывдин, А.Т. Кавешников. М.: МГУП, 2004 - 80с. ISBN 5-89231-119-8
11. СП 23.13330.2011 «Основания гидротехнических сооружений» (актуализированная редакция СНиП 2.02.02 - 85\*). 2012г.
12. СП 39.13330.2012 «Плотины из грунтовых материалов» (актуализированная редакция СНиП 2.06.05 - 84\*). 2012.
13. А.В. Михайлов, С.Н. Левачев. Внутренние водные пути. Гидросооружения водных путей, портов и континентального шельфа. Часть 1. Изд. АСВ. 2004.

## Приложение

Задания к курсовой работе выписывает руководитель курсовой работы в произвольном порядке во избежание повторяющихся из года в год работ.

Вариант	Грунт тела плотины	Глубина воды на отметке НПУ (м)	Категория дороги по гребню плотины	Объем водохранилища (м <sup>3</sup> )	Расход водосброса (м <sup>3</sup> /с)
1	песок мелкозернистый	8,6	V	9606895	142
2	глина	7,7	V	1998995	14,10
3	песок мелкозернистый	7,7	V	1998995	14,7
4	супесь	9,3	IV	7607090	15,4
5	песок мелкозернистый	10,2	IV	8808753	18
6	суглинок	11,3	IV	7757422	35
7	суглинок	10	IV	5784353	24
8	супесь	10,9	IV	8975830	30
9	суглинок	9,5	V	9616891	15,1
10	суглинок	9,7	IV	7054352	20
11	песок мелкозернистый	10,4	V	3559683	22
12	суглинок	10,5	IV	2204256	15,7
13	песок мелкозернистый	8,8	без категории	2204105	16,3
14	глина	11,2	V	7805342	24,5
15	глина	10,3	IV	2345407	18,7
16	суглинок	8,9	V	2204105	15,7
17	глина	11,1	IV	7805342	18,7
18	песок мелкозернистый	7,9	IV	2345407	22
19	супесь	8,3	V	2204256	24
20	суглинок	9,6	V	5784353	14,7
21	глина	10,2	IV	8808753	24,5
22	песок мелкозернистый	10,4	IV	3559683	14,7
23	супесь	9,7	V	9606895	14,10
24	песок мелкозернистый	9,5	без категории	3559683	142
25	песок мелкозернистый	9,1	IV	8808753	18,7
26	супесь	10,8	V	1998995	24,5
27	супесь	11,2	V	9616891	35
28	песок мелкозернистый	11	IV	3559683	16,3
29	глина	8,9	V	8808753	18
30	глина	9,9	IV	1998995	142