

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

*Кафедра гидравлики*

**РАСЧЕТ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК  
НА ПЛОСКИЕ И СЕГМЕНТНЫЕ  
ЗАТВОРЫ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ**

Методические указания к выполнению  
расчетно-графической работы по гидравлике  
для студентов специальностей  
270104 «Гидротехническое строительство»  
и 270102 «Промышленное и гражданское строительство»

12

---

Москва 2010

---

**Составитель**

**проф., канд. техн. наук Н.И. Подземельных**

**Рецензент**

**проф., канд. техн. наук А.Л. Зуйков**

## ВВЕДЕНИЕ

Цель указаний – помочь студентам в освоении методики расчета сил гидростатического давления на плоские и цилиндрические поверхности гидротехнических затворов, а также методика определения нагрузок на их элементы (ригели).

При выполнении расчетно-графической работы необходимо:

- построить эпюры избыточного гидростатического давления на затвор;
- определить силу избыточного гидростатического давления на затвор;
- разбить эпюру избыточного гидростатического давления на равно-великие части (по числу ригелей);
- определить координаты центров давления как для всего затвора, так и для каждой равновеликой части эпюры гидростатического давления;
- указать расположение равнонагруженных ригелей в затворе и определить нагрузку на 1 пог. м ригеля.

Работа выполняется в виде пояснительной записки (формат - стандартный лист писчей бумаги размером 297x210 мм), в которой излагаются исходные данные и методы решения поставленных задач. К пояснительной записке прикладываются чертежи, выполненные на отдельных листах миллиметровки того же формата или формата 297x420 мм.

Пояснительная записка начинается с титульного листа (прил. 1). После титульного листа помещается подписанное преподавателем задание на данную работу (прил. 2). Записка должна быть написана чернилами, разборчиво, либо распечатана на принтере и подписана студентом.

## 1. ЗАТВОРЫ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Затворы устанавливаются в гидротехнических сооружениях для перекрытия водопропускных отверстий. Полное и частичное открытие затворов позволяет осуществить сброс воды из верхнего бьефа в нижний.

В зависимости от места расположения перекрываемого отверстия в теле плотины затворы делятся на поверхностные и глубинные.

Поверхностные затворы располагаются на гребне водосливной плотины, при этом верх затвора в закрытом положении располагается выше уровня воды в верхнем бьефе (рис. 1).

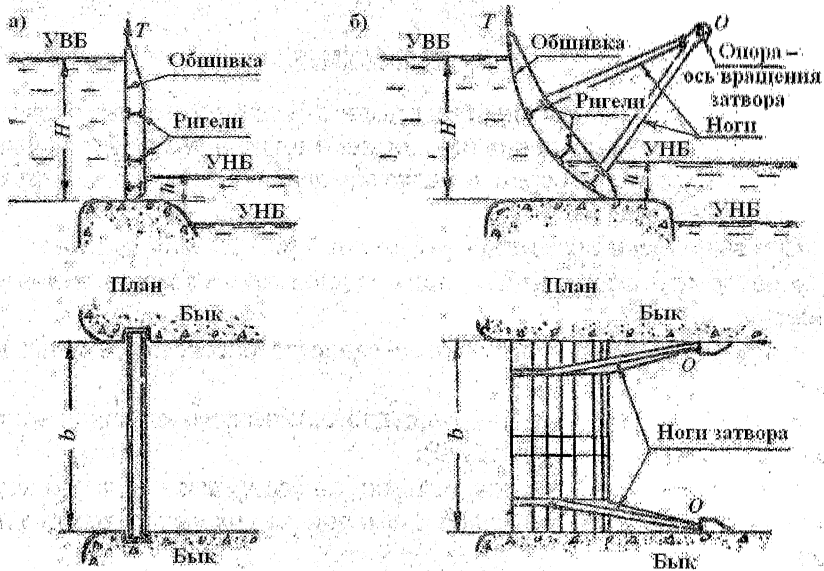


Рис. 1. Поверхностные затворы:  
а – плоский, б – сегментный

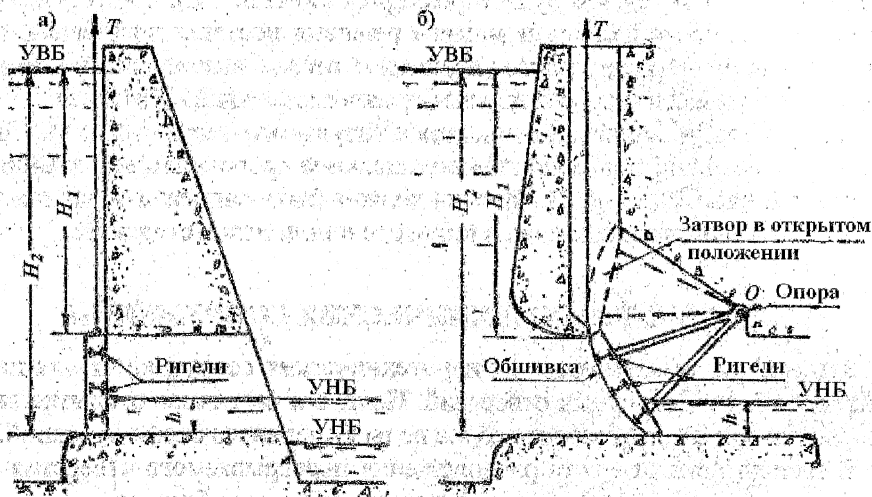


Рис. 2. Глубинные затворы:  
а – плоский, б – сегментный

Глубинные затворы служат для закрытия глубинных отверстий в плотинах (водоспуски, водозаборы и т.п.), верх этих затворов в закрытом положении находится ниже уровня воды в верхнем бьефе (рис. 2).

В практике гидротехнического строительства используется более 100 различных типов и разновидностей затворов.

На рис. 1 и 2 представлены два типа наиболее распространенных затворов и показаны силы  $T$ , с помощью которых осуществляется подъем затворов для открытия отверстий.

Плоские затворы обычно перемещаются в пазах быков или береговых устоев, которые являются и опорами для затворов. Для уменьшения силы трения, возникающей при подъеме и опускании затвора, плоские затворы иногда оборудуются колесами.

Поверхности сегментных затворов обычно принимаются цилиндрическими. Подъем сегментных затворов осуществляется путем вращения их относительно оси  $O$  (см. рис. 1,б, 2,б), которая одновременно является и опорой затвора.

Основные конструктивные элементы плоских и сегментных затворов:

- *ригели* – горизонтальные балки (швеллеры и двутавры), являющиеся главными несущими элементами затвора и передающие силу давления на опоры затвора;

- *вертикальные стойки и диафрагмы*, а также *горизонтальные вспомогательные балки*, воспринимающие нагрузки от обшивки затвора и передающие ее на ригели;

- обшивка затвора, выполняемая обычно из листовой стали (иногда из дерева) толщиной не менее 6 мм, на которую непосредственно действует вода.

В состав сегментных затворов входят еще "ноги", через которые сила давления воды передается на быки.

Затворы бывают двух- и многоригельными.

Определение гидростатических нагрузок на затвор и его элементы необходимо для расчета всех его элементов на прочность.

## 2. РАСЧЕТ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ПЛОСКИЕ ЗАТВОРЫ

### 2.1. Построение эпюр давления на обшивку затворов

Нагрузка на затворы гидротехнических сооружений формируется давлением воды на их обшивку со стороны верхнего и нижнего бьефов.

Давление в любой точке поверхности обшивки затвора направлено

по нормали к поверхности и определяется по основному уравнению гидростатики

$$P = P_0 + \rho gh,$$

где  $P_0$  – давление на поверхности жидкости, Па;

$\rho$  – плотность жидкости;  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;

$g$  – ускорение свободного падения;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;

$h$  – глубина погружения рассматриваемой точки под поверхность жидкости, м.

Давление на поверхности  $P_0$  в гидротехнических сооружениях обычно равно атмосферному, действует с обеих сторон затвора (со стороны верхнего и нижнего бьефов) и взаимно уравновешивается. Поэтому на несущие элементы затвора (ригели, балки, ноги, опоры) от обшивки будет передаваться только давление воды, определяемое зависимостью

$$P = \rho gh.$$

Из эпюры  $ABE$  давления воды на поверхностный плоский затвор при отсутствии воды за затвором (рис. 3) видно, что максимальное давление воды на нижней кромке затвора равно

$$P = \rho gh = 1000 \cdot 9,81 \cdot 8 = 78480 \text{ Па}.$$

На рис. 4 даны эпюры давления воды со стороны верхнего бьефа  $ABE$  и нижнего бьефа  $aBb$  на поверхностный плоский затвор при наличии воды за затвором глубиной  $h_n$ . В данном случае треугольные части эпюры давления  $FE'E$  – со стороны верхнего бьефа и  $aBb$  – со стороны нижнего бьефа взаимно уравновешиваются, и на затвор будет действовать нагрузка в виде суммарной эпюры давления  $ABE'F$ .

Ординаты эпюры давления воды  $NBEK$  на обшивку  $NB$  плоского глубинного затвора при отсутствии воды за затвором (рис. 5) следующие:

- на верхней кромке затвора  $P = \rho gh = 1000 \cdot 9,81 \cdot 8 = 78480 \text{ Па}$ ;
- на нижней кромке затвора  $P = \rho gh = 1000 \cdot 9,81 \cdot 12 = 117720 \text{ Па}$ .

На рис. 6 даны эпюры давления воды на обшивку  $NB$  плоского донного затвора: со стороны верхнего бьефа эпюра  $NBEK$ , со стороны нижнего бьефа  $aBb$  и эпюра суммарного давления  $NBE'FK$  (при наличии воды за затвором).

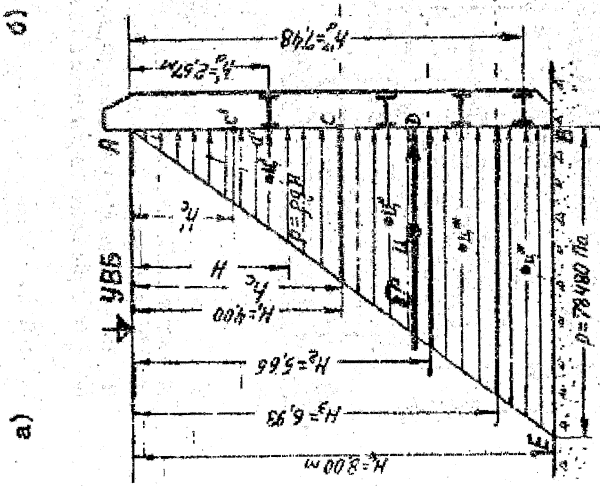
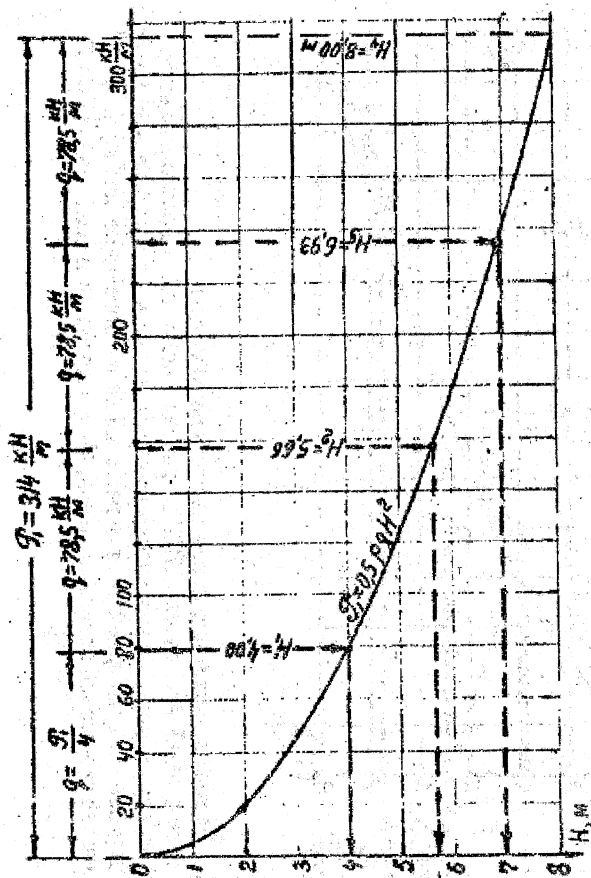


Рис. 3. Поверхностный плоский затвор при отсутствии воды за ним:

а — эпюра  $ABE$  давления воды на затвор (разбивка эпюры  $ABE$  на равновеликие части и расположение ригелей в затворе); б — кривая зависимости силы давления на верхнюю часть затвора шириной  $1\text{ м}$  от глубины воды  $H$  (графический метод разбивки суммарной эпюры давления на равновеликие части);  $1, 2, 3, 4$  — центры тяжести равновеликих частей суммарной эпюры давления,  $C$  — центр тяжести всей эпюры  $ABE$

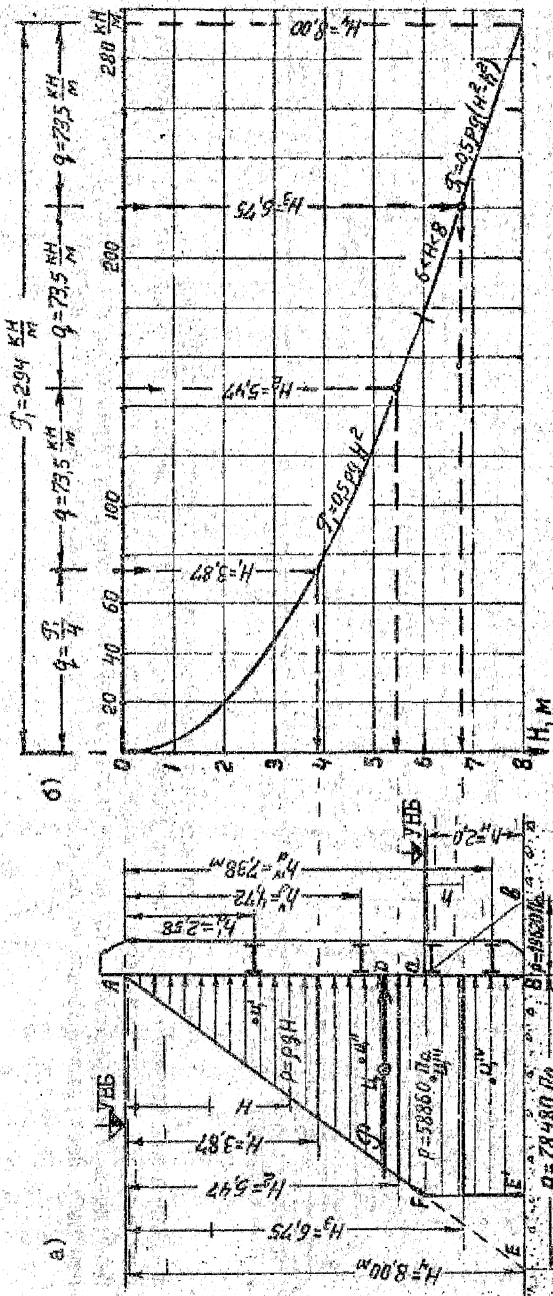


Рис. 4. Поверхностный плоский затвор при наличии воды за ним:

а — эпюра  $ABE'F$  давления воды на затвор (разбивка эпюры  $ABE'F$  на равновеликие части и расположение результирующей в затворе); б — кривая зависимости суммарной силы давления на верхнюю часть затвора шириной 1 м от глубины воды  $H$  (графический метод разбивки суммарной эпюры давления на равновеликие части);  $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5, h_6$  — центры тяжести равновеликих частей суммарной эпюры давления,  $C$  — центр тяжести всей эпюры  $ABE'F$ .



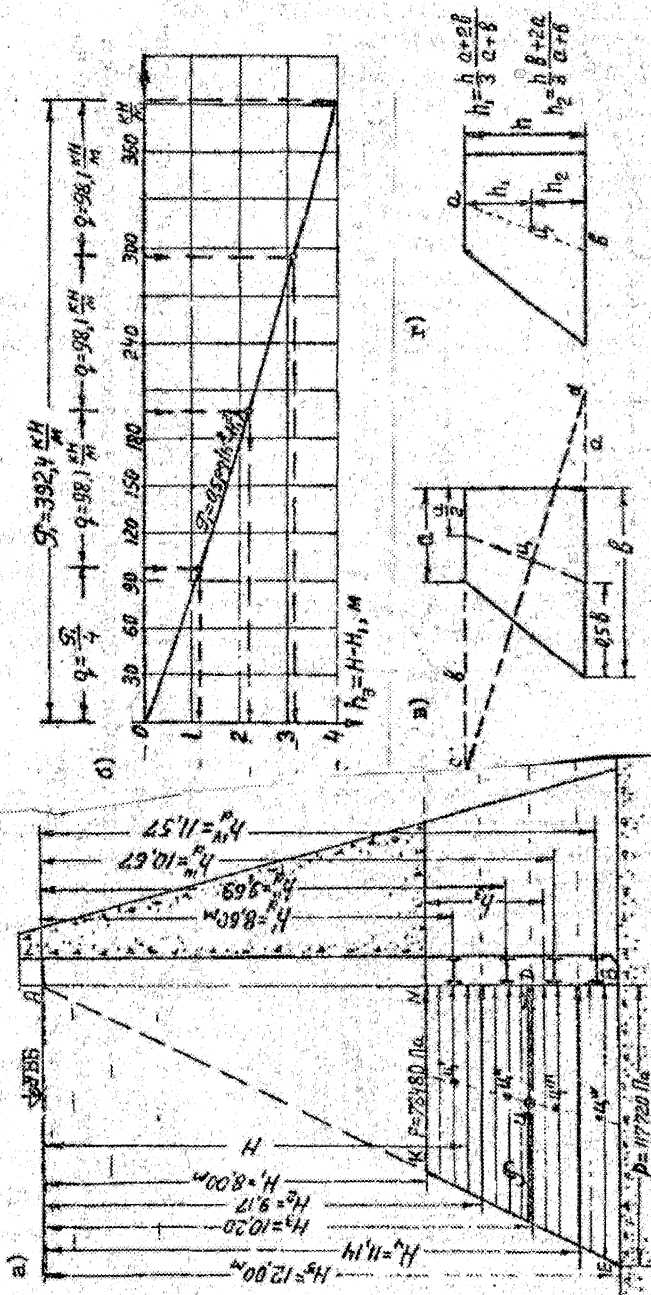


Рис. 5. Глубинный плоский затвор при отсутствии воды за ним:

а – эпюра NBEK давления воды на затвор, разбивка эпюры NBEK на равновеликие части и расположение ригелей в затворе; б – кривая зависимости суммарной силы давления на верхнюю часть затвора шириной 1 м от высоты  $h_3 = H - H_1$  (графический метод разбивки эпюры давления на равновеликие части); в-г – то же, но аналитическим методом;  $q, q^{\text{II}}, q^{\text{III}}, q^{\text{IV}}$  – центры тяжести равновеликих частей эпюры давления; Ц – центр тяжести всей эпюры NBEK



$$y = \frac{\omega_1 y_1 + \omega_2 y_2 + \omega_3 y_3}{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3}$$

Рис. 6. Глубинный плоский затвор при наличии воды за ним.

а – эшора  $NBE'FK$  давления воды на затвор, разбивка эшоры  $NBE'FK$  на равновеликие части и расположение ригелей в затворе; б – кривая зависимости суммарной силы давления на верхнюю часть затвора шириной 1 м от высоты  $h_3 = H - H_1$  (графический метод разбивки суммарной эшоры давления на равновеликие части); в – то же, но аналитическим методом;  $h, y^I, y^{II}, y^{III}, y^{IV}$  – центры тяжести равновеликих частей суммарной эшоры давления;  $C$  – центр тяжести всей эшоры  $NBE'FK$

## 2.2. Определение силы давления на затвор и центра давления

Суммарная сила давления воды на плоскую обшивку затвора определяется по формуле

$$\mathcal{F} = P_c \omega, \quad (1)$$

где  $\omega$  – площадь поверхности затвора, на которую передается давление воды (смоченная поверхность);

$P_c$  – давление воды в центре тяжести площади  $\omega$ .

Для поверхностного затвора шириной  $b$ , напором  $H$  площадь  $\omega$ , избыточное давление в центре тяжести  $P_c$  и сила давления со стороны верхнего бьефа  $\mathcal{F}_B$  определяются по следующим зависимостям:

$$\omega = Hb; \quad P = \rho g h_c = \rho g \frac{H}{2}, \quad (2)$$

$$\mathcal{F}_B = \rho g \frac{H^2}{2} b. \quad (3)$$

В формуле (2)  $h_c$  – глубина погружения центра тяжести смоченной поверхности затвора (точка С) под свободной поверхностью жидкости. Свободная поверхность жидкости – поверхность, граничащая с газовой средой, в данном случае атмосферой, где давление равно атмосферному.

Если за затвором (со стороны нижнего бьефа) имеется вода глубиной  $h_H$  (см. рис. 4,б), то она давит на затвор с силой

$$\mathcal{F}_H = \rho g \frac{h_H^2}{2} b.$$

Равнодействующая сил давления воды со стороны верхнего и нижнего бьефов является расчетной силой, действующей на затвор, и будет равна

$$\mathcal{F} = \mathcal{F}_B - \mathcal{F}_H = 0,5 \rho g (H^2 - h_H^2) b. \quad (4)$$

Если зависимости (3) и (4) разделить на ширину затвора  $b$ , то получим силы давления, приходящиеся на 1 пог. м ширины затвора:

- при отсутствии воды за затвором  $\mathcal{F}_I = 0,5 \rho g H^2$ , (5)

- при наличии воды за затвором  $\mathcal{F}_I = 0,5 \rho g (H^2 - h_H^2)$ . (6)

Следует отметить, что зависимости (3) и (4) выражают объем суммарной эпюры давления на весь затвор, а зависимости (5) и (6) – на 1 м ширины затвора и численно равны площади суммарной эпюры давления.

Силы давления на глубинные затворы определяются также по формуле (1). При этом площадь поверхности затвора  $\omega$  избыточное давление  $P_c$  в центре тяжести площади  $W$  и силы давления на нее со стороны верхнего бьефа определяются по зависимостям (см. рис. 5):

$$\omega = (H_2 - H_1) b; \quad P_c = \rho g h_c = \rho g \frac{H_2 + H_1}{2}; \quad \mathcal{F}_B = \rho g \frac{H_2^2 - H_1^2}{2} b \quad (7)$$

Если уровень воды в нижнем бьефе выше нижней кромки обшивки затвора, то суммарная сила давления на затвор будет равна разности сил давления воды со стороны верхнего и нижнего бьефов. При частичном подтоплении затвора со стороны нижнего бьефа, т.е. при  $h_n < H_5 - H_1$  (см. рис. 6)

$$\mathcal{P} = \mathcal{P}_B - \mathcal{P}_H = 0,5\rho g(H_5^2 - H_1^2 - h_n^2)b, \quad (8)$$

где  $h_n$  — глубина воды за затвором;

$H_5 - H_1$  — высота затвора.

Разделив зависимости (7) и (8) на  $b$ , получим силы давления, приходящиеся на 1 пог. м ширины затвора:

- при отсутствии воды за затвором (см. рис. 5)  $\mathcal{P}_1 = 0,5\rho g(H_5^2 - H_1^2)$ ;
- при наличии воды за затвором (см. рис. 6)  $\mathcal{P}_1 = 0,5\rho g(H_5^2 - H_1^2 - h_n^2)$ .

Точка пересечения линии действия суммарной силы давления с поверхностью затвора называется центром давления и обозначается буквой  $D$ .

Глубина погружения центра давления  $D$  под свободной поверхностью жидкости при треугольной и трапецидальной эпюре давления (см. рис. 3, 5) определяется зависимостью

$$h_D = h_c + \frac{I_0}{h_c \omega},$$

где  $\omega$  — площадь смоченной поверхности затвора;

$h_c$  — глубина погружения центра тяжести рассматриваемой площади затвора  $\omega$  под свободной поверхностью жидкости;

$I_0$  — момент инерции площади поверхности затвора  $\omega$  относительно оси, проходящей через центр тяжести площади и параллельно горизонтальной свободной поверхности жидкости.

Очевидно, что линия действия равнодействующей сил давления  $\mathcal{P}$  проходит через центр тяжести суммарной эпюры давления. На рис. 3 - 6 центр тяжести суммарной эпюры давления воды на затвор помечен буквой  $C$ , а центры тяжести равновеликих частей эпюры давления -  $c^I$ ,  $c^{II}$  и т.д.

Известно, что центр тяжести треугольной эпюры давления расположен на расстоянии  $2H/3$  от его вершины или на расстоянии  $H/3$  от его основания. Центр тяжести трапецидальной эпюры давления можно определить графическим путем (см. рис. 5, в). Для этого середины оснований трапеции соединяются линией, затем на продолжении малого основания  $a$  откладывается большее основание  $b$ , на продолжении большого

основания  $b$  откладывается малое основание  $a$ , полученные точки  $c$  и  $d$  соединяют линией. Точка пересечения линии  $c-d$  с линией, соединяющей середины оснований, и является центром тяжести трапеции.

Положение центра тяжести трапецидальной эпюры давления можно определить и по правилам геометрии: он находится на линии, соединяющей середины её оснований и на расстоянии (рис. 5.г):

- от меньшего основания  $h_1 = \frac{h(a+2b)}{3(a+b)}$ ;
- от большего основания  $h_2 = \frac{h(2a+b)}{3(a+b)}$ ,

где  $h$  – высота трапеции;

$a, b$  – соответственно длина малого и большого основания трапеции.

Положение центра тяжести сложных эпюр давления, состоящих из прямоугольных и треугольных или трапецидальных частей (эпюра АВЕ'F на рис. 4 и эпюра NBE'FK на рис. 6), определяется из условия равенства статического момента всей площади эпюры и суммы статических моментов составляющих её площадок (прямоугольников, треугольников) относительно, например, одного из оснований (см. рис. 6,в) по зависимости

$$y = \frac{\omega_1 y_1 + \omega_2 y_2 + \omega_3 y_3}{\omega_1 + \omega_2 + \omega_3},$$

где  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  – площади составляющих площадок;

$y_1, y_2, y_3$  – расстояния от центров тяжести этих площадок до оси, относительно которой определяются статические моменты.

### 2.3. Определение нагрузки на 1 пог.м ригеля

При проектировании затворов обычно стремятся поставить все ригели одинакового поперечного сечения. Это достигается путем передачи одинаковых нагрузок на все ригели. В данном случае, при силе давления на 1 пог. м затвора  $\mathcal{P}_1$  и числе ригелей в затворе  $n$  нагрузка на 1 пог. м равнонагруженных ригелей будет равна

$$q = \mathcal{P}_1 / n.$$

Для обеспечения передачи одинаковой нагрузки на все ригели суммарная эпюра давления делится на  $n$  равновеликих частей (площади которых численно равны  $q$ ) и определяются центры тяжести этих частей эпюры давления. Линии действия сил  $q$  проходят через центры тяжести соответствующих равновеликих частей эпюры давления, а точки пересечения этих линий с поверхностью обшивки затвора являются частными центрами давления этих сил. Ригели располагаются в затворе по линиям действия сил  $q$ , что обеспечивает равную нагрузку на них и исключает образование крутящих моментов.

## 2.4. Деление эпюры давления на равновеликие площади

### 2.4.1. Расчетный способ

Рассмотрим деление треугольной эпюры давления  $ABE$  на  $n$  равновеликих частей (по числу ригелей - см. рис. 3, где число ригелей  $n = 4$ ).

Вся площадь эпюры давления представляет силу давления на 1 пог. м затвора и равна

$$\mathcal{P}_1 = 0,5\rho g H^2.$$

На верхний ригель передается треугольная эпюра давления высотой  $H_1$ , площадь которой равна нагрузке  $q$  на 1 пог.м ригеля. Это условие можно представить равенством

$$q = \mathcal{P}_1 / n = 0,5\rho g H^2 / n = 0,5\rho g H_1^2,$$

откуда получим  $H_1 = H / \sqrt{n}$ .

При  $H = H_4 = 8$  м,  $n = 4$ ;  $H_1 = H / \sqrt{n} = 8 / \sqrt{4} = 4$  м.

На два верхних ригеля передается треугольная эпюра давления высотой  $H_2$ , площадь которой равна  $2q$ .

По аналогии можно записать равенство

$$2q = 2\mathcal{P}_1 / n = \rho g H^2 / n = 0,5\rho g H_2^2,$$

откуда  $H_2 = H \sqrt{2/n} = 8\sqrt{2/4} = 5,66$  м.

В общем случае  $H_i = H \sqrt{i/n}$ . (9)

Таким образом, вычисленные глубины  $H_1, H_2, \dots, H_{n-1}$ , делят эпюру давления на  $n$  равновеликих площадей.

Этот принцип лежит в основе метода деления других форм эпюр давления на  $n$  равновеликих площадей. Следует иметь в виду, что зависимость (9) применима только при треугольной форме эпюры давления на затвор. Деление эпюры давления, отличной от треугольной формы (например, изображенной на рис. 4), производится следующим образом.

Определяют нагрузку на 1 пог. м ригеля:

$$q = \mathcal{P}_1 / n = 0,5\rho g (H^2 - h_n^2) / n.$$

Затем определяют высоту  $H_1$  треугольной части эпюры давления, передаваемой на верхний ригель, из условия

$$q = 0,5\rho g H_1^2,$$

откуда  $H_1 = \sqrt{2q/\rho g}$ , и т.д.

Высота  $H_2$  треугольной части эпюры, передаваемой на два верхних ригеля, определяется из условия

$$2q = 0,5\rho g H_2^2,$$

откуда  $H_2 = \sqrt{4q/\rho g}$ , и т.д.

Для глубинного затвора (см. рис. 5) нагрузка на 1 пог. м затвора равна

$$\mathcal{P}_1 = 0,5\rho g(H_3^2 - H_1^2).$$

На верхний ригель необходимо передать трапецеидальную эпюру давления от глубины  $H_1$  до  $H_2$  с основаниями  $\rho g H_1$  и  $\rho g H_2$ , площадь эпюры равна нагрузке  $q$  на 1 пог. м ригеля. Из этого условия можно записать равенство

$$q = \mathcal{P}_1 / n = \rho g(H_2^2 - H_1^2) / 2n = \rho g(H_2^2 - H_1^2) / 2,$$

откуда определяется неизвестная величина  $H_2$ . Подобным образом определяются глубины  $H_3, H_4$  и т.д.

Если нижняя часть эпюры давления имеет прямоугольную форму (см. рис. 4 и 6), то деление нижней части эпюры на равновеликие площади можно вести, идя снизу вверх и используя зависимость

$$h = q / \rho g(H_3 - h_n),$$

где  $h$  – высота отсекаемой снизу площади эпюры, равной  $q = \mathcal{P}_1 / n$ ;

$\rho g(H_3 - h_n)$  – ордината прямоугольной части эпюры, равная разности давлений со стороны верхнего и нижнего бьефов.

#### 2.4.2. Графический способ

При графическом способе деления эпюры давления на  $n$  (по числу ригелей) равновеликих площадей строится кривая силы давления (см. рис. 3,а,б), которая показывает зависимость силы давления на 1 пог. м верхней части затвора высотой  $H$ .

Например, для поверхностного затвора, изображенного на рис. 3, кривая силы давления описывается уравнением

$$\mathcal{P}_1 = 0,5\rho g H^2.$$

При  $H = 8,0$  м, что соответствует полному напору на затвор, имеем

$$\mathcal{P}_1 = 0,5\rho g H^2 = 0,5 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 8^2 = 313920 \text{ Н/м} \approx 314 \text{ кН/м},$$

где  $\mathcal{P}_1$  представляет силу давления воды на 1 пог. м ширины затвора.

Разделив отрезок оси абсцисс величиной  $\mathcal{P}_1$  на  $n$  равных частей (по числу ригелей), определяем нагрузку на 1 пог. м ригеля. Полученные точки с оси абсцисс сносят на кривую давления, а линии, проведенные параллельно оси абсцисс из этих точек, делят эпюру давления на равновеликие части.

При наличии воды за поверхностным затвором (см. рис. 4) кривая силы давления описывается двумя уравнениями:

- до уровня воды в нижнем бьефе  $\mathcal{P}_1 = 0,5\rho g H^2$ ;
- ниже уровня воды в нижнем бьефе  $\mathcal{P}_1 = 0,5\rho g(H^2 - h_n^2)$ .

После построения кривых сил давления, полученные эпюры делят на  $n$  (по числу ригелей) равновеликих частей.

Таким же образом строятся кривые сил давления для глубинных затворов:

- при отсутствии воды за затвором  $\mathcal{P}_1 = 0,5\rho g(H_5^2 - H_1^2)$ ;
- при наличии воды за затвором  $\mathcal{P}_1 = 0,5\rho g(H_5^2 - H_1^2 - h_H^2)$

и выполняют разбивку суммарной силы на  $n$  (по числу ригелей) равновеликих частей.

Следует иметь в виду, что кривая давления ниже уровня воды нижнего бьефа является прямой линией.

Для определения месторасположения ригелей графическим способом необходимо определить центры тяжести равновеликих частей эпюры давления. Графический и аналитический способы определения центров тяжести эпюр давления даны в подразд. 2.2. Если через центр тяжести равновеликих частей эпюры давления провести линии перпендикулярно поверхности затвора, то точки пересечения этих линий с поверхностью затвора дадут месторасположение ригелей.

### 3. РАСЧЕТ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА СЕГМЕНТНЫЕ ЗАТВОРЫ

#### 3.1. Аналитический способ определения силы и центра давления

Для криволинейной поверхности затвора шириной  $b$  элементарные силы давления, оставаясь каждая перпендикулярной соответствующей элементарной площадке, не параллельны между собой, и при определении силы давления суммируются их проекции на координатные оси, вследствие чего получают составляющие  $\mathcal{P}_X$ ,  $\mathcal{P}_Y$ ,  $\mathcal{P}_Z$ . Суммарная сила давления на криволинейную поверхность определяется как геометрическая сумма ее составляющих по координатным осям:

$$\mathcal{P}^2 = (\mathcal{P}_X)^2 + (\mathcal{P}_Y)^2 + (\mathcal{P}_Z)^2 \quad (10)$$

Поверхность обшивки сегментных затворов обычно принимается цилиндрической, и при расположении оси цилиндрической поверхности по оси  $OY$  имеем  $\mathcal{P}_Y = 0$ , и формула (10) принимает следующий вид:

$$\mathcal{P} = \sqrt{(\mathcal{P}_X)^2 + (\mathcal{P}_Z)^2} \quad (11)$$

На рис. 7 и 8 приведены поверхностный и глубинный сегментные затворы. Горизонтальная составляющая  $\mathcal{P}_X$  равна силе давления жидкости на проекцию цилиндрической поверхности на плоскость, перпендикулярную оси  $OX$ , и определяется как для плоских затворов (см. разд. 2).

При отсутствии воды за затвором со стороны нижнего бьефа:

- для поверхностного затвора (см. рис. 7, эпюра  $ABE$ )



$$\mathcal{P}_X = 0,5 \rho g H^2 b; \quad (12)$$

- для глубинного затвора (см. рис. 8, эпюра  $KBEN$ )

$$\mathcal{P}_X = 0,5 \rho g (H_2^2 - H_1^2) b. \quad (13)$$

При наличии воды за затвором глубиной  $h_H$ :

- для поверхностного затвора (см. рис. 7, эпюра  $ABE'E''$ )

$$\mathcal{P}_X = 0,5 \rho g (H^2 - h_H^2) b; \quad (14)$$

- для глубинного затвора (при  $h_H < H_2 - H_1$ )

$$\mathcal{P}_X = 0,5 \rho g (H_2^2 - H_1^2 - h_H^2) b. \quad (15)$$

Горизонтальная составляющая силы давления воды на затвор  $\mathcal{P}_X$  проходит через центр тяжести эпюры давления (точка  $C$  на рис. 7,а; 8,а).

Вертикальная составляющая  $\mathcal{P}_Z$  равна весу жидкости в объеме тела давления  $W$ :

$$\mathcal{P}_Z = \rho g W. \quad (16)$$

Тело давления – призма, высота которой равна ширине затвора  $b$ , а основание для поверхностного затвора (см. рис. 7,а) – площадь  $\omega$  фигуры 1-8-13-14-1, для глубинного затвора (см. рис. 8,а) – площадь  $\omega$  фигуры 1-6-9-10-11-1. Объем тела давления  $W$  – объем, заключенный между поверхностью обшивки затвора, плоскостью свободной поверхности жидкости и вертикальными плоскостями, проведенными через верхнюю и нижнюю точки на образующей поверхности затвора.

Таким образом, объем тела давления равен

$$W = \omega b.$$

При наличии воды за затвором объем тела давления определяется от поверхности воды в нижнем бьефе, например, при глубине воды за затвором  $h_H$  (см. рис. 7,а) основание тела давления будет  $\omega_{1-8-10-15-14-1}$ , а объем

$$W = b \omega_{1-8-10-15-14-1}.$$

Площадь основания  $\omega$  тела давления представляет собой сложную фигуру. Поэтому при расчете её площади она разбивается на простые фигуры (треугольник, сегмент, прямоугольник), площади которых определяются по известным формулам геометрии. Общая площадь  $\omega$  будет равна сумме площадей этих простых фигур.

Вертикальная составляющая силы давления воды  $\mathcal{P}_Z$  проходит через центр тяжести объема тела давления  $C_2$  и при призматической его форме – через центр тяжести площади  $\omega$  (точка  $C_2$  на рис. 7,а и 8,а). Координаты центра тяжести  $C_2$  площади  $\omega$  определяются из условия

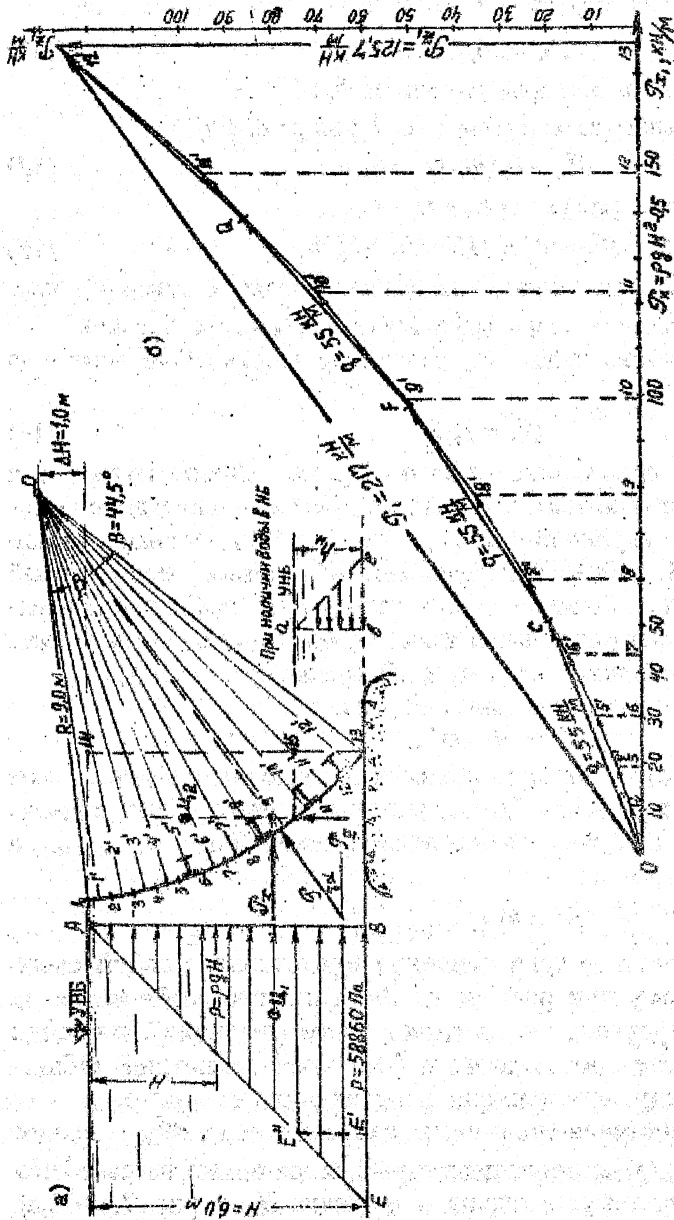


Рис. 7. Поверхностный сегментный затвор:

а — эпюра давления для  $P_x$ , тело давления, линии действия сил  $P_x, P_z, P$ , расположение ригелей;  
 б — интегральная кривая сил давления на 1 пог. м ширины затвора, определение сил  $P_x, P_z, P$ , нагрузка  $q$  на 1 пог. м ригелей и направления их действия;  $C_1$  — центр тяжести эпюры для  $P_x, C_2$  — центр тяжести тела давления (площади  $\omega_{1-8-13-14-1}$ )

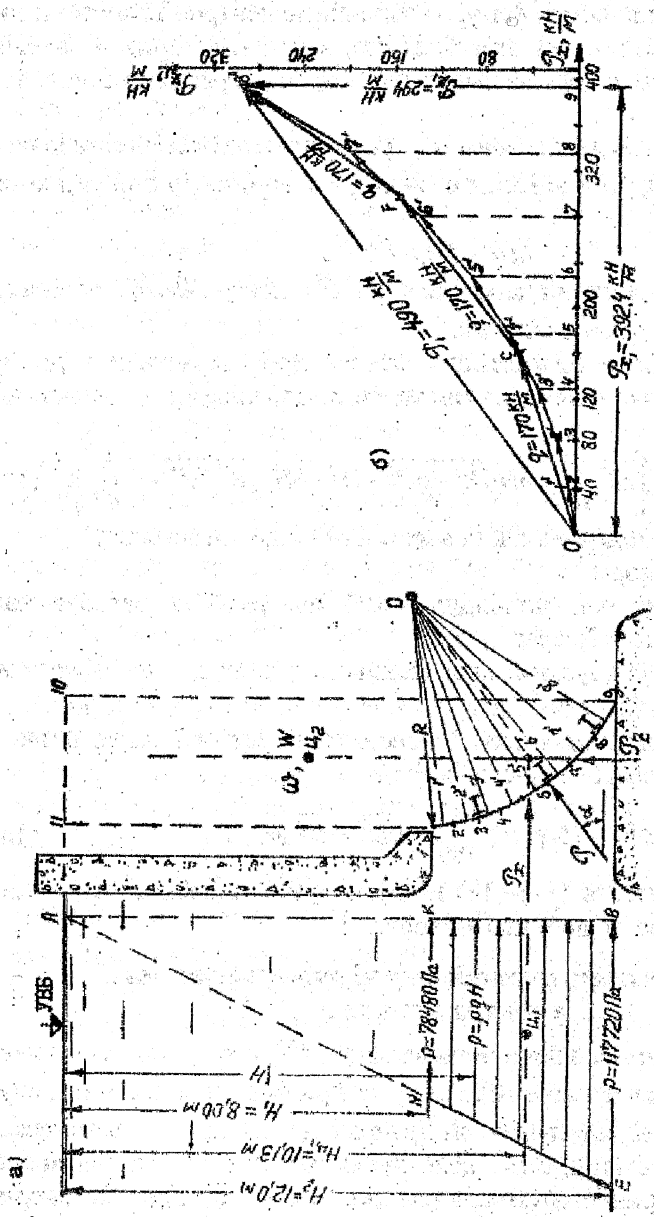


Рис. 8. Глубинный сегментный затвор при отсутствии воды за ним:  
 а — эпюра давления для  $P_x$ , площадь основания  $W$ , линии действия сил  $P_x$ ,  $P_z$ ,  
 $P$ , расположение ригелей в затворе, б — интегральная кривая сил давления на 1 пог. м ширины за-  
 твора, определение сил  $P_x$ ,  $P_z$ ,  $P$ , нагрузки  $q$  на 1 пог. м ригелей и направления их действия;  $C_z$   
 — центр тяжести эпюры для  $P_x$ ;  $C_z$  — центр тяжести тела давления (площадь  $\omega_{1-6-9-10-11-1}$ )

равенства статического момента всей площади  $\omega$  сумме статических моментов площадей простых фигур (координаты центров тяжести которых известны из геометрии) относительно, например, горизонтальных осей, расположенных в вертикальных плоскостях, ограничивающих тело давления.

Суммарная сила давления воды  $\mathcal{P}$  проходит через ось цилиндрической поверхности  $O$ , угол наклона её вектора к горизонту определяется по зависимости

$$\operatorname{tg} \alpha = \mathcal{P}_Z / \mathcal{P}_X.$$

Точка пересечения линии действия силы  $\mathcal{P}$  с поверхностью обшивки затвора является центром давления.

Для поверхностного сегментного затвора при отсутствии воды за ним вертикальная составляющая может быть определена по зависимости

$$\mathcal{P}_Z = 0,5 \rho g \left[ \pi R^2 \frac{\beta}{180} - \Delta H \sqrt{R^2 - \Delta H^2} - (H - \Delta H) \sqrt{R^2 - (H + \Delta H)^2} \right] b, \quad (17)$$

где  $R$  – радиус цилиндрической поверхности обшивки затвора;

$H$  – напор на затворе;

$\Delta H$  – превышение оси цилиндрической поверхности затвора над уровнем воды верхнего бьефа;

$\beta$  – угол между радиусами, проведенными к концам дуги обшивки, граничащей с водой (см. рис. 7,а).

При  $\Delta H = 0$  (ось цилиндрической поверхности затвора лежит в плоскости поверхности воды верхнего бьефа)

$$\mathcal{P}_Z = 0,5 \rho g \left[ \pi R^2 \frac{\beta}{180} - H \sqrt{R^2 - H^2} \right] b. \quad (18)$$

Разделив зависимости (11)–(18) на  $b$ , получим значения соответствующих сил на 1 пог. м ширины затвора.

### 3.2. Графоаналитический способ определения силы и центра давления

Определение вертикальной составляющей  $\mathcal{P}_Z$ , суммарной силы давления  $\mathcal{P}$  и угла наклона её к горизонту  $\alpha$  производится в данном случае путем построения интегральной кривой давления, представляющей собой многоугольник сил, действующих на отдельные части цилиндрической поверхности затвора (см. рис. 7,б и 8,б). При этом горизонтальные составляющие сил  $\mathcal{P}_X$  определяются аналитическим способом.

Для этого цилиндрическая поверхность затвора точками 1, 2, 3 и т.д. делится соответственно на полосы 1 - 2, 1 - 3, 1 - 4 и т.д., и для каждой из этих полос необходимо определить силу давления воды и линию ее действия. Дугу поверхности затвора можно разбить, например, по высоте через 0,5 м.

Построение многоугольника сил производится следующим образом.

На оси абсцисс откладывается в масштабе от начала координат горизонтальные проекции сил давления, действующие на верхнюю часть затвора и определяемые по зависимости (на 1 пог. м затвора):

- для поверхностного затвора  $\mathcal{P}_x = 0,5\rho gh_i^2$ ;
- для глубинного затвора  $\mathcal{P}_x = 0,5\rho g(H_i^2 - H_1^2)$ ,

где  $h_i$  и  $H_i$  — глубины погружения рассматриваемых точек поверхности затвора под поверхностью воды.

Концы этих сил на оси абсцисс помечены точками 2, 3, 4 и т.д. Отрезки оси абсцисс между соседними точками, например, 5 - 6; 6 - 7 в выбранном масштабе представляют собой горизонтальные проекции сил, действующих соответственно на полоски 5 - 6 и 6 - 7 цилиндрической поверхности затвора. Нетрудно заметить, что эти отрезки равны площади горизонтальной эпюры давления, заключенной между горизонтальными линиями, проведенными через точки 5, 6, 7. Таким образом, на оси абсцисс имеются горизонтальные проекции всех сил  $\Delta\mathcal{P}$ , действующих на все полоски цилиндрической поверхности затвора.

В точках 2, 3, 4 и т.д. к оси абсцисс восстанавливаются перпендикуляры, а середины полосок поверхности затвора соединяются с осью цилиндрической поверхности  $O$  лучами 1', 2', 3', 4' и т.д.

Силы  $\Delta\mathcal{P}$ , будучи нормальными к соответствующим площадкам поверхности затвора, проходят через ось  $O$  цилиндрической поверхности затвора. С некоторой погрешностью примем, что силы  $\Delta\mathcal{P}$  проходят через середины полосок цилиндрической поверхности и, следовательно, действуют по направлению лучей 1', 2', 3' и т.д.

Из начала оси абсцисс (см. рис. 8,б) проводим линию параллельно лучу 1' на затворе до пересечения, с перпендикуляром, восстановленным к оси абсцисс в точке 2. Точку пересечения обозначим 1'. Отрезок  $O-1'$  в соответствующем масштабе дает величину силы  $\Delta\mathcal{P}_1$  давления воды на верхнюю полоску затвора 1 - 2 шириной  $b = 1$  м. Затем из точки 1' проводим линию параллельно лучу 2' до пересечения с перпендикуляром, восстановленным в точке 3 оси абсцисс. Точка пересечения этих линий обозначена 2'. Отрезок 1'- 2' на интегральной кривой

представляет силу  $\Delta \mathcal{P}_2$ , действующую на полосу 2 - 3 затвора. Далее из точки 2' проводим линию параллельно лучу 3' на затворе до пересечения с перпендикуляром к оси абсцисс в точке 4. Точка пересечения этих линий обозначена 3'. Отрезок 2' - 3' на интегральной кривой - сила  $\Delta \mathcal{P}_3$ , действующая на полосу затвора 3 - 4. Таким же образом производится последовательное построение всех сил.

В итоге получаем для поверхностного затвора (см. рис. 7,б) ломаную линию 0 - 3' - 4' - 5' - 6' - 7' - 8' - 9' - 10' - 11' - 12', а для глубинного затвора (см. рис. 8,б) 0 - 1' - 2' - 3' - 4' - 5' - 6' - 7' - 8'. Замыкающая прямая линия многоугольника сил для поверхностного затвора 0 - 12' (см. рис. 7,б), а для донного 0 - 8' (см. рис. 8,б) представляет собой равнодействующую на 1 пог. м затвора  $\mathcal{P}_1$ .

Отрезки оси абсцисс 0 - 13 и оси ординат 13 - 12' (см. рис. 7,б), 0 - 9 и 9 - 8' (см. рис. 8,б) дают в выбранном масштабе соответственно горизонтальную  $\mathcal{P}_{IX}$  и вертикальную  $\mathcal{P}_{IZ}$  составляющие силы  $\mathcal{P}_1$  на 1 пог. м ширины затвора. Силы давления на весь затвор шириной  $b$  определяются по зависимостям

$$\mathcal{P}_X = \mathcal{P}_{IX} b, \quad \mathcal{P}_Z = \mathcal{P}_{IZ} b, \quad \mathcal{P} = \mathcal{P}_1 b.$$

Линией действия силы  $\mathcal{P}$  на затвор будет линия, проведенная через ось  $O$  цилиндрической поверхности затвора параллельно суммарной силе  $\mathcal{P}_1$  на интегральной кривой. Точка пересечения линии действия силы  $\mathcal{P}$  с поверхностью обшивки затвора будет центром давления.

### 3.3. Определение нагрузки на 1 пог. м ригелей и месторасположение их в затворе

Если через вершины многоугольника сил давления провести плавную кривую, то получим интегральную кривую сил давления, которая будет являться силовым "многоугольником" при делении цилиндрической поверхности на бесконечное множество полос (на рис. 7,б и 8,б она не дана, чтобы не ухудшать наглядность построения).

Интегральная кривая делится на  $n$  (по числу ригелей) равных дуг, и концы этих дуг соединяются хордами (см. рис. 7,б, где можно видеть 4 равной длины хорды 0 - C, C - F, F - Q и Q - 12', соответствующие 4 ригелям, на рис. 8,б имеем 3 ригеля и, следовательно, 3 равной длины хорды 0 - C, C - F и F - 8').

Хорды, вписанные в интегральную кривую, представляют собой многоугольник сил, геометрическая сумма которых равна силе давле-

ния  $\mathcal{P}_1$  на 1 пог. м ширины затвора. Следовательно, хорды  $O - C$ ,  $C - F$  и т.д. на рис. 7,б и 8,б в соответствующем масштабе являются силами, которые передаются на ригели затвора. Поскольку интегральная кривая построена для 1 пог. м ширины затвора, то длина хорды с учетом масштаба чертежа дает нагрузку  $q$  на 1 пог. м ригеля.

Для определения месторасположения ригелей в затворе через центр цилиндрической поверхности затвора  $O$  проводятся линии параллельно хордам  $O - C$ ,  $C - F$  и т.д. интегральной кривой давления. Точки пересечения этих линий с поверхностью затвора являются местом расположения ригелей.

Образец титульного листа

---

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

*Кафедра гидравлики*

РАСЧЕТ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК  
НА ПЛОСКИЕ И СЕГМЕНТНЫЕ ЗАТВОРЫ

Расчетно-графическая работа по гидравлике

Студент.....

Факультет.....

Курс.....

Группа.....

Вариант.....

Зачтено

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

*Преподаватель*

МОСКВА \_\_\_\_\_ г.



## Задания к расчетно-графической работе

## Плоский затвор\*

№ варианта	Отметки, м			$b, м$	Количество ригелей
	УВБ	У\НБ	Верх затвора		
1	2	0,7	2	6	3
2	3	1,0	3	9	3
3	10	2,0	3	6	3
4	12	1,5	3	6	3
5	4	0,5	4	12	4
6	5	1,0	5	15	4
7	14	1,0	4	8	3
8	16	1,0	4	8	3
9	6	3,0	6	18	4
10	2	0,5	2	6	3
11	20	2,0	5	10	4
12	24	2,0	6	12	4
13	3	0,75	3	9	3
14	4	1,0	4	12	3
15	28	2,0	3	6	2
16	30	2,0	3	6	2
17	5	1,0	5	15	4
18	6	1,5	6	18	4
19	34	2,4	4	8	3
20	38	1,0	4	8	3
21	2,5	0,5	2,5	7,5	2
22	3,5	3,5	3,5	10,5	2
23	42	2,0	5	10	3
24	46	2,0	6	12	3
25	4,5	1,0	4,5	13,5	3
26	5,5	1,5	5,5	16,5	3
27	50	2,0	3	6	2
28	55	2,0	3	6	2
29	6,5	2,0	6,5	19,5	4
30	3	0,5	3	9	2
31	60	1,5	4	8	3
32	65	2,0	4	8	3
33	4	1,5	4	12	3

\*Отметка низа затвора для всех вариантов равна 0.

## Сегментный затвор\*

№ варианта	Отметки, м				b, м	R, м	Количество ригелей
	УВБ	УНБ	Верх затвора	Ось вращения			
1	10	0	3	3,5	6	4,5	3
2	12	0	4	4,5	8	6,0	3
3	3	0	3	3,5	5	4,5	3
4	2	0	2	2,2	5	3,0	2
5	16	1	4	4,8	8	6,0	4
6	14	1	5	5,8	10	7,5	4
7	5	0	5	5,6	10	7,5	3
8	4	0	4	4,8	8	6,0	4
9	26	0	6	7,0	12	9,0	3
10	20	2	4	4,5	8	6,0	3
11	2	0,5	2	2,5	5	3,0	2
12	4	1	4	4,5	8	6,0	3
13	30	2	5	5,8	10	7,5	4
14	28	2	6	7,0	12	9,0	4
15	3	0,75	3	3,5	6	4,0	2
16	5	1	5	5,8	10	7,5	4
17	38	1	4	4,5	8	6,0	3
18	34	1	5	5,8	10	7,5	3
19	6	1,5	6	7,0	12	9,0	4
20	2,5	0,5	2,5	3,0	6	3,5	2
21	46	2	5	5,8	10	7,5	4
22	42	2	7	7,5	14	12,0	5
23	3,5	0,8	3,5	4,0	12	6,0	3
24	5,5	1,5	5,5	6,0	12	8,0	4
25	55	0	6	6,2	12	9,0	5
26	50	0	6	6,5	12	11,0	5
27	4,5	1	4,5	4,5	10	7,0	4
28	3	0,5	3	3,5	6	5,5	4
29	65	0	5	5,8	15	10,0	5
30	60	0	6	6,8	18	12,0	5
31	6,5	2	6,5	7,0	15	11,0	5
32	4	1,5	4	4,5	12	7,0	4
33	35	0	3,5	4,0	9	6,0	4

\* Отметка низа затвора для всех вариантов равна 0.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	1
1. Затворы гидротехнических сооружений.....	1
2. Расчет гидростатических нагрузок на плоские затворы.....	3
2.1. Построение эпюр давления на обшивку затворов.....	3
2.2. Определение силы давления на затвор и центра давления.....	9
2.3. Определение нагрузки на 1 пог. м ригеля.....	11
2.4. Деление эпюры давления на равновеликие площади.....	12
2.4.1. Расчетный способ.....	12
2.4.2. Графический способ.....	13
3. Расчет гидростатических нагрузок на сегментные затворы.....	14
3.1. Аналитический способ определения силы и центра давления.....	14
3.2. Графоаналитический способ определения силы и центра давления.....	18
3.3. Определение нагрузки на 1 пог. м ригелей и месторасположение их в затворе.....	20
Приложение 1. Образец титульного листа.....	22
Приложение 2. Задания к расчетно-графической работе.....	23

**РАСЧЕТ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК  
НА ПЛОСКИЕ И СЕГМЕНТНЫЕ  
ЗАТВОРЫ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ**

Методические указания к выполнению  
расчетно-графической работы по гидравлике  
для студентов специальности  
270104 «Гидротехническое строительство»  
и 270102. «Промышленное и гражданское строительство»

*Редактор А.К. Смирнова  
Корректор В.К. Чупрова  
Компьютерная правка и верстка С.М. Сивоконевой*

---

Подписано к печати 03.02. 2010 г.    Формат 60x84 1/16    Печать офсетная

И-341

Объем 2 п.л

Т. 250

Заказ 45

---

Московский государственный строительный университет.  
Типография М ГСУ. 129337, Москва, Ярославское ш.,26