

где  $u_{\min}, u_{\max}$  — ограничения на ресурсы управления;  $T$  — время оптимального регулирования; функции  $\psi_1(t), \psi_2(t)$  специальным образом строятся по параметрам рассматриваемых задач.

В силу соотношения (17) можем заключить, что оптимальное управление в рассматриваемых задачах регулирования уровней воды в канале имеет релейный тип, т.е. в каждый момент времени принимает крайние значения из множества своих ресурсов. Структура оптимального управления изображена на рис. 2.

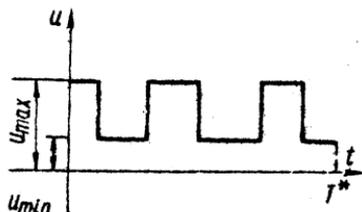


Рис. 2. Структура оптимального управления.

Полученные результаты позволяют утверждать, что автоматические регуляторы, предназначенные для оптимального управления уровнем воды в канале, должны быть релейного типа.

#### Л и т е р а т у р а

1. Чертоусов М. Д. Гидравлика. Специальный курс, М.,—Л., 1963.
2. Агроскин И. И., Дмитриев Г. Т., Пикалов Ф. И. Гидравлика, М., 1954.
3. Костяков А. Н. Основы мелиорации, М., 1960.
4. Жуковский Н. Е. Гидродинамика. Полн. собр. соч., т. III, 1936.
5. Маковский Э. Э. Автоматизация гидротехнических сооружений в системах каскадного регулирования расходов воды. Фрунзе, 1972.
6. Понтрягин Л. С. и др. Математическая теория оптимальных процессов, М., 1969.
7. Габасов Р., Кириллова Ф. М. Принцип максимума в теории оптимального управления, Минск, 1974.

В. А. Пенъкевич, И. В. Филиппович

#### БАКУУМНОСТЬ КОМБИНИРОВАННОГО ВОДОСЛИВА

Вакуумные водосливы, обладая рядом преимуществ по сравнению с безвакуумными (большой коэффициент расхода, меньшая площадь поперечного сечения и др.), имеют тот недостаток, что пазы рабочих затворов, расположенные на гребне водослива, способствуют срыву вакуума.

В опытах Н.П.Розанова [1] на вакуумных водосливах с  $\alpha = 2$  в случае пазов для шандорных и рабочих затворов в криволинейно заостренных быках, вынесенных в сторону верхнего бьефа на  $a = (1,14—1,41) r_{\phi}$  или  $a = (0,38—0,47) H_o$ , при  $\frac{H_o}{r_{\phi}} = 1,07$ , наблюдалось аэрирование водосливного потока воздухом, просочившимся через рабочие пазы, а при  $\frac{H_o}{r_{\phi}} = 2,07—3,08$  происходил частичный отрыв струи от водосливной поверхности. Полный отрыв струи наблюдался при  $\frac{H_o}{r_{\phi}} = 2,93—3,46$ .

Пролет комбинированного водослива, принцип построения которого описан в работе [2], а данные испытаний модели приведены в работе [3], имеет среднюю (с повышенным вакуумом) и две крайние (безвакуумные или с незначительным вакуумом) секции.

Построенные по координатам Кригера—Офицерова крайние секции создают на оголовке у пазов рабочих затворов область с повышенным давлением, по сравнению с давлением на средней секции. Область низкого давления, т.е. вакуума, отделяется от пазов рабочих затворов областью повышенного давления, вследствие чего влияние пазов на срыв вакуума значительно снижается.

Комбинированный водослив, с пазами для рабочих и шандорных затворов в полуциркульных быках при  $a = 0,528 r_{\phi}$  или  $a = 0,147 H_{\text{проф}}$ ,  $\alpha = 3$  и  $K = 0,565$ , работал устойчиво до  $\frac{H_o}{r_{\phi}} = 4,09$  или  $\frac{H_o}{H_{\text{проф}}} = 1,15$  (больших значений  $\frac{H_o}{r_{\phi}}$  в опытах не было) [3]. Воздух, искусственно подведенный под струю, быстро уносился потоком. При работе водослива в пазах рабочих затворов образовывался вихревой "шнур" на глубину 6—7 см, а в пазах шандорных затворов — на 3—5 см при глубине потока на гребне водослива до 12,5 см. Наблюдавшееся явление обнаруживается также и на безвакуумных водосливах [4, 5]. С уменьшением отношения  $\frac{H_o}{r_{\phi}} \left( \frac{H_o}{H_{\text{проф}}} \right)$  длина вихревого "шнура" уменьшается.

Сопоставляя для вакуумного и комбинированного водослива отношения  $\frac{H_0}{r \phi}$ , характеризующие устойчивость вакуума,

следует заметить, что средняя секция исследованного комбинированного водослива более вакуумна, так как имеет параметр  $\alpha = 3$ . К тому же в комбинированном водосливе вынос быков в верхний бьеф был значительно меньший, чем у сопоставимого вакуумного. Последнее обстоятельство по исследованиям Н.П.Розанова [1], способствует срыву вакуума за счет возможности прорыва воздуха в область вакуума через зону отжима струи быками.

Вместе с тем уменьшение величины  $\alpha$  является конструктивно важным фактором. В работе [1] делается предположение о возможности уменьшения отношения  $\frac{a}{r \phi}$  при полукруглых

быках.

Таким образом, исследованный комбинированный водослив, несмотря на факторы, увеличивающие вакуум, при наличии пазов в быках оказался вакуумно устойчивым при значительно большем отношении  $\frac{H_0}{r \phi}$ , чем у вакуумного.

Для выявления причин, которые обусловили устойчивую работу комбинированного водослива при наличии пазов в быках и высоких значениях  $\frac{H_0}{r \phi}$ , рассмотрим приведенное на рис. 1

распределение относительных давлений на гребне водослива по его ширине.

По данным Н.П.Розанова [1], для вакуумного водослива с параметрами  $\frac{\bar{P}}{r \phi} = 9,38$ ,  $\frac{a}{r \phi} = 1,14$ ,  $\alpha = 2$  и криволинейно

заостренными быками. распределение относительных давлений по ширине водосливного пролета (рис. 1, а) характеризуется следующим. В плоской задаче относительные давления по ширине пролета практически одинаковы. В пространственной задаче, с быками без пазов, давление у быков (на расстоянии  $0,07 b$ , где  $b$  -- ширина пролета), по сравнению с давлением по оси водосливного пролета, увеличивается незначительно (в 1,06 раза). При наличии же пазов давление у быков повышается в 1,8—2,0 раза.

Таким образом, у вакуумных водосливов быки с пазами повышают давление по оси пролета примерно в 1,2 раза (у быков в 2—2,3 раза). В основном давление увеличивается вследствие влияния пазов, расположенных на гребне водослива.

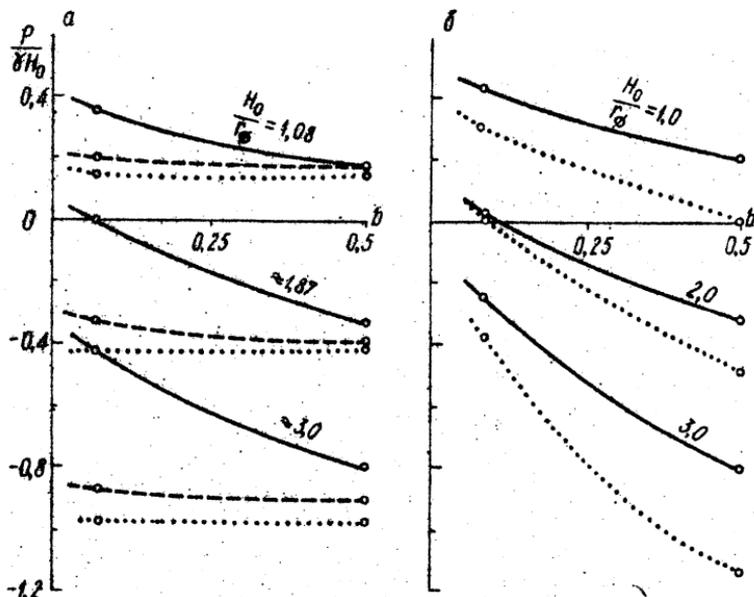


Рис. 1. Кривые распределения относительных давлений по ширине вакуумного (а) и комбинированного (б) водосливов (сплошные линии — быки с пазами, штриховые — без пазов, пунктирная — плоская задача).

Для комбинированного водослива с параметрами  $\frac{P}{r \phi} = 8,8$ ;  $\frac{a}{r \phi} = 0,528$ ;  $\alpha = 3$  и полукруглыми быками характерно

следующее (рис. 1, б). В случае плоской задачи относительные давления у стен лотка (на расстоянии  $0,09 b$ ) в 2,5—3,0 раза больше, чем по оси пролета. Быки с пазами также увеличивают относительные давления по оси пролета и у быков в 1,4—1,5 раза.

Таким образом, в комбинированном водосливе увеличение относительного давления у быков достигается в значительной степени за счет очертания оголовка, примыкающего к быкам. Влияние же быков с пазами существенно меньше, чем у вакуумного водослива.

Кривые, приведенные на рис. 1, непосредственно не сопоставлялись в связи с различием параметров водосливов.

По исследованиям А.Р.Березинского [4] и А.С.Офицерова [5], в безвакуумном водосливе Кригера—Офицерова быки с пазами снижают давления в примыкающей к ним (быкам) зоне. По исследованиям Н.П.Розанова [1], в вакуумном водосливе, наоборот, у быков с пазами давления увеличиваются.

Очевидно, существует такой оптимальный профиль водослива, для которого влияние быков с пазами на изменение давления в зоне быков будет незначительным. Профиль крайней секции комбинированного водослива, построение которого описано в работе [3], приближается к оптимальному.

Для оценки степени вакуумности комбинированного водослива вычислены значения коэффициентов вакуумности

$$\sigma = \frac{h_{\text{вак}}}{H_0},$$

где  $h_{\text{вак}}$  — максимальный вакуум на оголовке водослива. В полученные на модели [3] значения коэффициентов вакуумности внесена поправка на масштаб модели по формуле Н.П.Розанова [1].

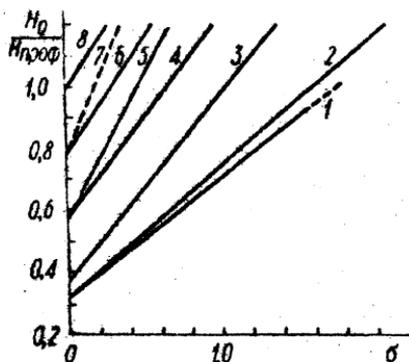


Рис. 2. Зависимости  $\sigma = f \left( \frac{H_0}{H_{\text{проф}}} \right)$  для вакуумного водослива  $\varphi = 4,17$  см,

$\alpha = 3$ ) (1); средней секции комбинированного водослива в плоской задаче ( $K = 0,488$ ) (2); средней секции комбинированного водослива в пространственной задаче ( $K =$

$= 0,565$ ) (3); крайней секции комбинированного водослива в плоской задаче (4); крайней секции комбинированного водослива в пространственной задаче (5); исходного профиля в плоской задаче (6); исходного профиля в пространственной задаче (7); профиля Кригера—Офицерова в плоской задаче (8).

На рис. 2 приведены опытные зависимости  $\zeta = f \left( \frac{H_o}{H_{\text{проф}}} \right)$

для водосливов комбинированного и исходного профилей в условиях плоской и пространственной задач. Кривая для исходного профиля в пространственных условиях получена пересчетом опытных данных для этого профиля в плоской задаче с учетом закономерностей перехода к пространственной задаче, установленных для комбинированного водослива. Коэффициенты вакуумности для вакуумного водослива ( $r_{\phi} = 4,17$ ,  $\alpha = 3$ ) взяты из работ [1, 6] и пересчитаны в зависимости от  $\frac{H_o}{H_{\text{проф}}}$  при  $H_{\text{проф}}$

= 15 см. Прямая 1, отображающая эту зависимость, графически проэкстраполирована до отношения  $\frac{H_o}{H_{\text{проф}}} = 1,0$  ( $\frac{H_o}{r_{\phi}} = 3,6$ ).

Для сравнения приведена кривая для профиля Кригера—Офицера (плоская задача), а кривая для вакуумного водослива в условиях пространственной задачи не показана, так как формула Н.П.Розанова для учета пространственности задачи, по мнению автора [1], является приближенной и дает завышенное значение коэффициента вакуумности. К тому же в сопоставляемых водосливах быки вынесены в сторону верхнего бьефа на разные расстояния.

Анализ рис. 2 показывает, что при плоской задаче имеет место некоторое уменьшение коэффициента вакуумности в средней секции комбинированного водослива по сравнению с вакуумным. В крайней секции эти коэффициенты значительно меньше. Водослив исходного профиля имеет небольшую вакуумность. Если исходный профиль выполнить полностью по координатам Кригера—Офицера, то в крайних секциях можно ожидать еще меньшего вакуума. В этом случае, возможно, несколько уменьшится вакуум и в средней секции.

Для практических целей представляют интерес коэффициенты вакуумности комбинированного водослива для различных отношений  $\frac{H_{\text{проф}}}{r_{\phi}}$ ,  $\frac{H_o}{H_{\text{проф}}}$  и параметра К.

Для определения коэффициента вакуумности в общем случае используется формула, структура которой предложена Н.Р.Розановым [1]:

$$\sigma = \sigma_{\text{пл}} \psi_{\text{ф}} \psi_{\text{пр}} \psi_{\text{кр}}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{пл}}$  — коэффициент вакуумности вакуумного водослива в условиях плоской задачи;  $\psi_{\text{ф}}$  — коэффициент формы водослива;  $\psi_{\text{пр}}$  — коэффициент, учитывающий пространственность задачи;  $\psi_{\text{кр}}$  — коэффициент, учитывающий уменьшение вакуумности в крайней секции по сравнению со средней (введен авторами).

Данные Н.П.Розанова о коэффициенте вакуумности  $\sigma$  [1] являются исходными при его вычислении для комбинированного водослива.

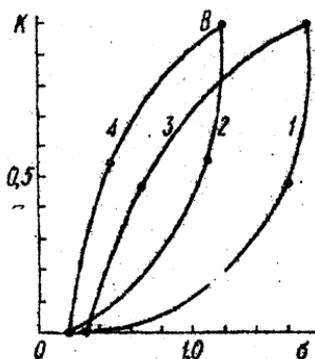


Рис. 3. Зависимости  $\sigma = f(K)$  при  $\frac{H_0}{H_{\text{проф}}} = 1,0$  и

$$\frac{H_{\text{проф}}}{r_{\text{ф}}} = 3,6 : 1,3 \text{ — плоская задача; } 2, 4 \text{ — пространственная (соответственно для средней и крайней секций).}$$

На рис. 3 приведены кривые зависимости  $\sigma = f(K)$  для средней и крайней секций комбинированного водослива при

$$\frac{H_0}{H_{\text{проф}}} = 1,0 \text{ и } \frac{H_{\text{проф}}}{r_{\text{ф}}} = 3,6, \text{ построенные по данным рис. 2.}$$

Число опытных точек для точного построения этих кривых недостаточно (нет еще опытов для других значений параметра  $K$ ). Однако общая тенденция кривых выявлена, а в пределах рациональных значений параметра  $K = 0,5-0,7$  они достаточно точны.

Как отмечалось ранее, на рис.2 не приведена кривая для вакуумного водослива в пространственных условиях в связи с приближенностью формулы для вычисления коэффициента  $\psi_{\text{пр}}$ .

По работе Н.П.Розанова [1], путем небольшой графической экстраполяции удалось установить, что для второй серии опытов с криволинейно-заостренными быками и открытыми пазами при  $\alpha = 2$ ,  $\frac{H_o}{r_\phi} = 3,6$  и  $a = 1,14 r_\phi$  по оси водосливного про-

лета коэффициент вакуумности равен  $\sigma = 1,10$  (без учета масштабной поправки). По нашим подсчетам, при  $\alpha = 3$ ,

$\frac{H_o}{r_\phi} = 3,6$  и  $a = 0,528 r_\phi$  с учетом масштабной поправки

коэффициент  $\sigma = 1,22$ . Увеличение коэффициента  $\sigma$  в нашем случае объясняется большей вакуумностью профиля и другим значением величины  $a$ . Таким образом, положение точки В на рис. 3 закономерно.

Коэффициент вакуумности в средней секции комбинированного водослива в случае плоской задачи ( $\sigma_{сп}$ ) из формулы (1)

$$\sigma_{сп} = \sigma_{пл} \psi_\phi, \text{ откуда } \psi_\phi = \frac{\sigma_{сп}}{\sigma_{пл}}$$

Для вакуумного водослива ( $K = 1$ )  $\psi_\phi = 1$ ; для комбинированного ( $K = 0,488$ ,  $H_o = H_{\text{проф}}$ )  $\psi_\phi = \frac{1,60}{1,76} = 0,908$  и для исходного профиля ( $K = 0$ )  $\psi_\phi = \frac{0,28}{1,76} = 0,159$  (рис. 2).

Коэффициент формы является функцией параметра  $K$ . Для полученных опытных отношений  $\frac{H_o}{H_{\text{проф}}}$  коэффициент формы

(при  $K = 0,488$ ) изменялся в небольших пределах  $\psi_\phi = 0,907$ — $0,912$ , что обусловлено степенью точности опытов. Среднее значение коэффициента формы принято равным  $\psi_\phi = 0,910$ .

Спрямив участок кривой (рис. 4, а) в пределах параметров  $K$ , представляющих практический интерес, получим формулу для коэффициента формы комбинированного водослива (кривые на рис. 4, а, б, в построены по данным рис. 3)

$$\Psi_{\phi} = 0,85 + 0,15 K \quad (2)$$

при  $0,45 \leq K \leq 1,0$ .

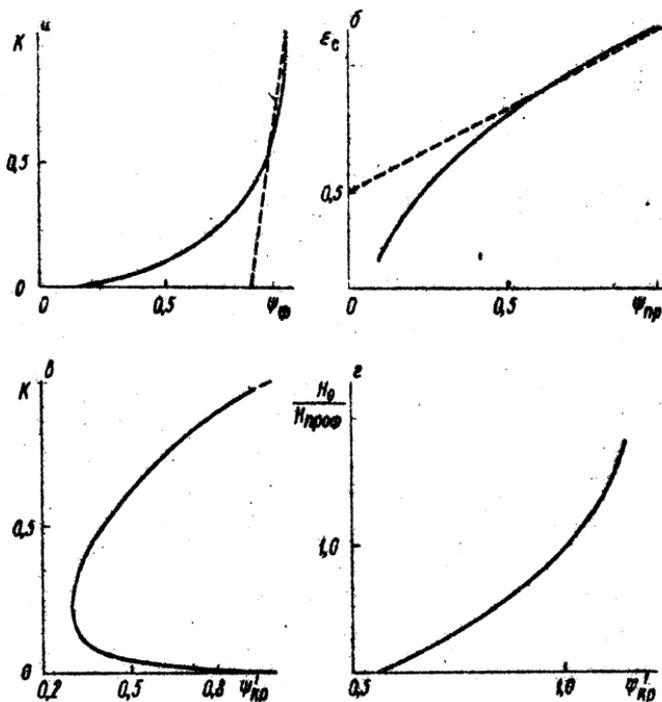


Рис. 4. Зависимости  $\Psi_{\phi} = f(K)$  (а),  $\Psi_{\phi} = f(\epsilon_c)$  (б),  $\Psi'_{кр} = f(K)$  (в),  $\Psi''_{кр} = f(\Psi'_{кр})$  (г).

Коэффициент, учитывающий переход от плоской задачи к пространственной, определяется так:

$$\Psi_{\text{пр}} = \frac{\sigma_{\text{сп}}^{\text{сп}}}{\sigma_{\text{пл}}^{\text{сп}}} = \frac{\sigma^{\text{кр}}}{\sigma_{\text{пл}}^{\text{кр}}}$$

где  $\sigma_{\text{сп}}^{\text{сп}}$ ,  $\sigma_{\text{пл}}^{\text{сп}}$  — коэффициенты вакуумности соответственно в средней и крайней секциях комбинированного водослива для

пространственной задачи;  $\sigma_{пл}^{ср}$ ,  $\sigma_{пл}^{кр}$  --- то же, для плоской задачи.

При коэффициенте бокового сжатия  $\epsilon_c = 0,863$  и  $H_o = H_{проф}$

$$\psi_{пр} = \frac{\sigma_{пл}^{ср}}{\sigma_{пл}^{ср}} = \frac{1,10}{1,60} = 0,687, \quad \psi_{пр} = \frac{\sigma_{пл}^{кр}}{\sigma_{пл}^{кр}} = \frac{0,47}{0,65} = 0,723.$$

При изменении напора в пределах  $0,7 \leq \frac{H_o}{H_{проф}} \leq 1,2$  величина коэффициента  $\psi_{пр}$  изменяется для обеих секций незначительно (0,687—0,723).

Для исследованной модели ( $\epsilon_c = 0,863$ ) принято среднее значение  $\psi_{пр} = 0,696$ .

График зависимости  $\psi_{пр} = f(\epsilon_c)$  изображен на рис. 4, б. В пределах  $0,75 \leq \epsilon_c \leq 1,0$  с некоторым запасом коэффициент, учитывающий пространственность задачи, находят по формуле

$$\psi_{пр} = 2,10 \epsilon_c - 1,10. \quad (3)$$

Коэффициент  $\psi_{кр}$ , учитывающий переход от средней секции к крайней (по вакуумности), для плоской и пространственной задач определяется отношением

$$\psi_{кр} = \frac{\sigma_{пл}^{кр}}{\sigma_{пл}^{ср}} = \frac{\sigma_{пл}^{кр}}{\sigma_{пл}^{ср}}.$$

В случае  $\frac{H_o}{H_{проф}} = 1,0$  коэффициент  $\psi'_{кр}$  равен  $\psi'_{кр} = \frac{\sigma_{пл}^{ср}}{\sigma_{пл}^{ср}} = \frac{0,65}{1,60} = 0,401$  для плоской задачи при  $K = 0,488$  и

$\psi'_{кр} = \frac{\sigma_{кр}}{\sigma_{ср}} = \frac{0,47}{1,10} = 0,427$  для пространственной задачи при  $K = 0,565$ . Для параметров  $K = 0$  и  $K = 1,0$  коэффициент  $\psi'_{кр} = 1,0$ , а для промежуточных значений  $K$  вычисляется по данным рис. 3.

На рис. 4 показана зависимость  $\psi'_{кр} = f(K)$  при  $\frac{H_o}{H_{проф}} = 1,0$ . Значения коэффициента  $\psi'_{кр}$  в зависимости от параметра  $K$  приведены в табл. 1.

Таблица 1.

K	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\psi'_{кр}$	0,35	0,41	0,47	0,56	0,67	0,80	1,0

Исследования показали, что коэффициент  $\psi_{кр}$  существенно зависит еще и от отношения напоров  $\frac{H_o}{H_{проф}}$  (как для плоской, так и для пространственной задач).

На рис. 4, г изображен график зависимости поправочного коэффициента  $\psi''_{кр}$  от отношения  $\frac{H_o}{H_{проф}}$  (табл. 2). Кривая на рис. 4, г построена по данным рис. 2.

Таблица 2

$\frac{H_o}{H_{проф}}$	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
$\psi''_{кр}$	0,55	0,75	0,89	1,0	1,08	1,13

Окончательно коэффициент, учитывающий уменьшение вакуума в крайней секции по сравнению со средней,  $\psi_{кр} = f(K, \frac{H_o}{H_{проф}})$  определяется по формуле

$\psi_{кр} = f(K, \frac{H_o}{H_{проф}})$  определяется по формуле

$$\psi_{кр} = \psi'_{кр} \cdot \psi''_{кр} \quad (5)$$

Рекомендуется следующий порядок определения коэффициента вакуумности комбинированного водослива. Для выбранного значения

$\frac{H_{проф}}{r_{ф}}$  по данным, приведенным в работах [1, 6] определяется коэффициент вакуумности для вакуумного водослива  $\sigma_{пл}$  (под отношением  $\frac{H_{о}}{r_{ф}}$  надо понимать отношение  $\frac{H_{проф}}{r_{ф}}$ ),

Затем по формулам (2), (3) и табл. 1 вычисляются поправочные коэффициенты, а по формуле (1) — значение коэффициента вакуумности для комбинированного водослива.

При изменении напора по сравнению с профилирующим изменяется отношение  $\frac{H_{о}}{r_{ф}}$  и, следовательно,  $\sigma_{пл}^b$ . Одновременно вводится и поправочный коэффициент  $\psi''_{кр}$  из табл. 2.

Анализ результатов исследований показывает, что в комбинированном водосливе при максимально допустимом значении

$\frac{H_{проф}}{r_{ф}} = 3,6$ , параметре  $K = 0,565$  и коэффициенте бокового сжатия  $\epsilon_c = 0,863$  коэффициент вакуумности по сравнению с

вакуумным водосливом в средней секции меньше на 10%, а в крайних, примерно, на 40%. Такое уменьшение вакуумности на крайних секциях достигается в значительной степени влиянием формы оголовка, а не пазов. В комбинированном водосливе зона с максимальным вакуумом в средней секции локализуется.

## Л и т е р а т у р а

1. Розанов Н. П. Вакуумные водосливные плотины с боковым сжатием. М., 1958.
2. Филиппович И. В. Гравитационная водосливная плотина комбинированного профиля. — "Гидротехническое строительство", 1965, № 4.
3. Пенькевич В. А., Филиппович И. В. Пропускная способность комбинированного водослива. — В сб.: Водное хозяйство Белоруссии. Вып. 4, Минск, 1974.
4. Березинский А. Р. Влияние бокового сжатия на пропускную способность водослива практического профиля. —

"Труды гидравлической лаборатории ВНИИ ВОДГЕО", 1948, сб. № 2. 5. Офицеров А. С. Пазы в быках и давление потока на водослив. — "Гидротехническое строительство", 1950, № 10. 6. Гидравлические расчеты водосливов, ТУиН проектирования гидротехнических сооружений. М., 1952.

Е. М. Левкевич, В. Н. Южновец

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛОГИХ НЕУКРЕПЛЕННЫХ ОТКОСОВ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН И ДАМБ НА ВОДОЕМАХ БССР

Одним из способов защиты земляных сооружений и берегов водохранилищ от размыва волнами является придание их откосам пологой формы, приближающейся к профилю динамического равновесия. Об эффективности защитной роли пологих откосов свидетельствует опыт эксплуатации ряда дамб с пляжными откосами, построенных на Киевском, Кременчугском, Днепродзержинском водохранилищах, на нескольких водохранилищах в Туркменской ССР, на Новосибирском водохранилище. В Белоруссии искусственные пляжи созданы на водохранилищах Заславльском и "Вяча", дамбы с пологими откосами возведены в рыбхозе "Любань", построена плотина на р. Лоша. Намечается в республике и дальнейшее строительство сооружений с пологими откосами.

В настоящее время имеется ряд методик по расчету профиля пологих откосов. Однако расчет по ним элементов пологих откосов является приближенным, и результаты существенно различаются между собой.

Анализ опубликованных материалов показывает, что наиболее приемлемыми для практического использования являются методики В. Л. Максимчука [1] и Б. А. Пышкина [2].

Для расчета пологих откосов, формирующихся в малых водоемах на территории БССР, даны рекомендации Ф. В. Саплюковым [3], которые также нуждаются в проверке, так как базируются на малом объеме материалов наблюдений (откосы дамб рыбхоза "Любань" и отелей Солигорского водохранилища).

Для выявления степени соответствия расчетных значений заложений пологих откосов по методикам [1—3] заложениям неукрепленных откосов, образовавшихся под воздействием вол-