

УДК 627.131:532.592.7

К РАСЧЕТУ ЛОКАЛЬНОГО РАЗМЫВА НИЖНИХ БЬЕФОВ ПЛОТИН С ТРЕЩИНОВАТЫМ СКАЛЬНЫМ ОСНОВАНИЕМ

Ш.Н. Гагошидзе, Н.А. Хонелидзе

Грузинский технический университет

Развит новый подход к исследованию размыва трещиноватых скальных пород падающими с высоких плотин потоками воды. В отличие от существующих методов, опирающихся на понятие так называемой допустимой на размыв скорости, предлагаемый метод учитывает такие важные факторы, обуславливающие размыв, как проницаемость падающего потока в трещины дна нижнего бьефа, блочное строение скального основания, раскрытие трещин, упругие свойства скальных отдельных и т.д. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными экспериментальных и натуральных наблюдений по размыву трещиноватого скального основания блочной структуры.

Ключевые слова: скальное основание, сброшенный поток, раскрытие трещины, проницаемость, выброс скальной отдельности.

Введение. В основу существующих методов расчета размывов скального грунта положено допущение, что размыв скального основания заканчивается тогда, когда скорость сбросного потока в яму размыва по мере увеличения ее глубины уменьшается до допустимой скорости. Последняя в настоящее время обычно определяется эмпирически, на основе экспериментальных наблюдений, или же по сильно упрощенным и малообоснованным схемам расчета, в которых, помимо прочих, не учитываются такие важные факторы, обуславливающие размыв, как трещиноватость и блочность скального основания, упругие свойства скальных отдельных, а также проницаемость сброшенного потока в скелет трещиноватой породы.

Очевидно, что размыв трещиноватого скального основания начинается с нарушения статической устойчивости скальной отдельности в своем гнезде и ее выброса вверх вследствие превышения гидродинамического давления на ее нижнюю грань (подошву) над давлением сверху. Это возможно только в том случае, если струя падающей воды, пробивая водяную подушку сверху, непосредственно воздействует на смежную отдельность и на щель между ней и рассматриваемой отдельностью. Из-за хорошей пьезопроводимости щели на подошве последней может появиться избыточное гидродинамическое давление струи, существенно большее, чем давление на отдельность сверху. Если это

превышение будет заметно перекрывать вес отдельности и силу кулонова трения по ее боковым поверхностям, отдельность будет вырвана из своего гнезда.

Постановка задачи и обоснование методики. Для вывода критериев выброса скальной отдельности и последующего расчета глубины локального размыва скального основания воспользуемся основными уравнениями перемещения (движения) блока (по форме, приведенной к прямоугольному параллелепипеду) в своем гнезде.

Дифференциальные уравнения движения скальной отдельности, составленные применительно к расчетной схеме, приведенной на рисунке, имеют вид

$$\begin{aligned} \rho_s' W_s \frac{d^2 z}{dt^2} &= -(\gamma_s - \gamma_0) W_s \cos \psi + p_1 b z \sin \psi + p_2^* b d - A b d z - \\ &\quad - f_1 c_x x (h - z) b - f_k c_\varphi \frac{(h - z)^2}{2} b \varphi; \\ \rho_s' W \frac{d^2 x}{dt^2} &= (\gamma_s - \gamma_0) W_s \sin \psi + p_1 b z \cos \psi - c_x x (h - z) b; \\ \theta_0 \frac{d^2 \varphi}{dt^2} &= p_1 b \frac{h - z}{2} z \cos \psi + p_1 b \frac{d}{2} z \sin \psi + c_x x \frac{h - z}{2} z b - c_\varphi \frac{(h - z)^2}{2} b \varphi, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ_s' - плотность блока с учетом присоединенной массы; $\rho_s' = \rho_s + r \rho_0$; ρ_s и ρ_0 - плотности скальной отдельности и воды; r - коэффициент присоединенной массы; W_s - объем скальной отдельности, приведенной к призме; γ_s, γ_0 - удельные веса скальной отдельности и воды; ψ - угол заложения скального основания к горизонту, совпадающий с углом напластования пород; p_1 - гидродинамическое давление, обусловленное обтеканием приподнятой из гнезда части блока; p_2^* - начальное гидродинамическое давление на подошву блока; b, d - ширина и толщина отдельности, приведенной к прямоугольному параллелепипеду; A обозначает величину $A = \gamma_0 \left(\frac{v}{k} + \cos \psi \right)$, где v - скорость турбулентного фильтрационного потока под подошвой приподнятого блока; k - коэффициент турбулентной фильтрации; z - вертикальное перемещение центра массы блока; f_1 - коэффициент кулонова трения при скольжении; c_x - коэффициент упругого отпора скальной породы или заполнителя трещин (если их мощность достаточно велика) при перемещении блока в сторону оси ox ; x - горизонтальное перемещение центра массы блока; f_k - коэффициент трения качения, который зависит от соприкасающихся материалов и опорной плоскости (обычно

$f_k < f_1$); c_φ - коэффициент упругого отпора скальной породы или заполнителя трещин (если их мощность достаточно велика) при повороте вокруг центра тяжести; φ - вращательное перемещение центра массы блока; θ - момент инерции блока относительно оси, проходящей через центр массы блока; τ и M - суммарные касательные напряжения и моменты сил относительно центра тяжести выбрасываемого блока в подвижной системе координат $x'oz'$; δ - ширина раскрытия трещин.

Появление p_2^* и A в (1) связано с определением гидродинамического давления p_2 (см. рис.), действующего на подошву приподнятого блока.

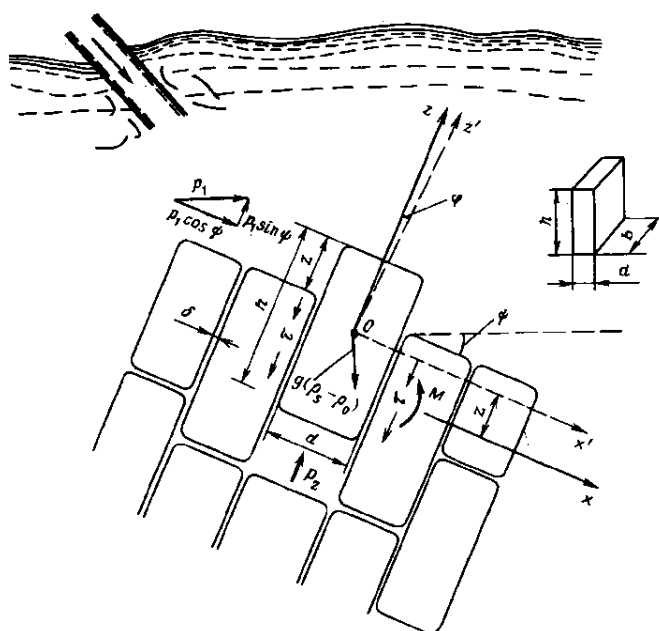


Рис. Расчетная схема выброса элемента из трещиноватого скального основания отброшенной струей

Согласно закону Дарси, скорость фильтрации воды в щелях, окружающих блок, определяется соотношением

$$g v = -k \left[g \cos \psi + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_2}{\partial (h - z)} \right]. \quad (2)$$

Примем скорость фильтрационного потока неизменяемой по длине щели $(h - z)$ и коэффициент фильтрации постоянным. Тогда интеграл уравнения (2) при граничном условии $z = 0, p_2 = p_2^*$ дает

$$p_2 = p_2^* - \gamma_0[(v/k) + \cos \psi]z = p_2^* - Az, \quad (3)$$

что и подставлено в (1).

Принимая в дальнейшем, что в процессе выброса блочной отдельности из своего гнезда качение блока относительно своего центра тяжести играет менее существенную роль, чем его смещения в направлении осей z и x (которые, в свою очередь, являются малыми величинами по сравнению с размерами блока), система уравнений (1) после её линеаризации приводится к следующей системе, состоящей из двух уравнений:

$$\begin{aligned} \rho_S \dot{W}_S \frac{d^2 z}{dt^2} &= -g(\rho_S - \rho_0)W_S \cos \psi - f_1 c_x x h b + p_1 b z \sin \psi + p_2^* b d - A b d z; \\ \rho_S \dot{W}_S \frac{d^2 x}{dt^2} &= g(\rho_S - \rho_0)W_S \sin \psi + p_1 b z \cos \psi - c_x b h x. \end{aligned} \quad (4)$$

Решение этой системы должно удовлетворять следующим начальным условиям: при $t = 0$, $x = x_0$, $\frac{dx}{dt} = 0$; $z = z_0$, $\frac{dz}{dt} = 0$.

В положении x_0 , z_0 блок находится в стационарном равновесии, и условие нарушения его статической устойчивости (выброса) имеет вид

$$p_2^* > \gamma_S h [(\rho_S - \rho_0) / \rho_S] (\cos \psi + f \sin \psi) + \frac{z_0}{d} (f \cos \psi - \sin \psi) p_1 + A z_0. \quad (5)$$

При этом в положении $z_0 = 0$ блок полностью опущен в своем гнезде, а при $z_0 = h$ - полностью выходит из гнезда.

Исследование динамической устойчивости в малом элементе для блока, находящегося в своем гнезде на дне воронки размыва, сводится к определению собственных значений матрицы

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{p_1 \sin \psi}{\rho_S \dot{d} h} - \frac{A}{\rho_S h} & 0 & -\frac{f c_x}{\rho_S d} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{p_1 \cos \psi}{\rho_S \dot{d} h} & 0 & -\frac{c_x}{\rho_S d} & 0 \end{vmatrix}, \quad (6)$$

что приводит к решению биквадратного уравнения для собственных чисел, т.е. для частот колебаний блока относительно положения равновесия, и указывает на динамическую неустойчивость блока, приподнятого из своего гнезда. В частности, если выполняются условия

$$\begin{aligned} c_x &< \frac{p_1}{h} \sin \psi - A \frac{d}{h}; \\ A &> \left(\frac{p_1}{h} \sin \psi - \gamma_0 f \cos \psi \right), \end{aligned} \quad (7)$$

приподнятый блок обязательно покинет свое гнездо. В противном случае, он будет совершать колебательное движение, амплитуда которого зависит от сочетания гидродинамических усилий, действующих на блочную отдельность.

Эти критерии указывают на то, что при оценке устойчивости скальной отдельности в своем гнезде определенное значение приобретает учет упругих свойств как самой отдельности, так и заполнителя трещин.

В [1] дается оценка гидродинамических характеристик, действующих на блочную структуру скального основания, входящих в условия ее устойчивости. В частности, для расчета избыточного гидродинамического противодавления в трещиноватом скальном основании блочной структуры использовано одномерное уравнение движения жидкости с переменным расходом вдоль пути, записанное в виде

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{v^2}{2g} \right) + \frac{1}{\gamma_0} \frac{dp}{dx} + i_f - i_0 + \frac{Q}{g\omega^2} \frac{dQ}{dx} = 0, \quad (8)$$

где v - скорость протекания жидкости через трещины скального основания; p - давление; i_f - уклон трения. Аналогично формуле Шези, $i_f = Q^2/k^2 = Q^2/\omega^2 C_m^2 R$, где Q - переменный расход жидкости вдоль магистральной трещины; k - модуль расхода; ω - площадь поперечного сечения трещины; C_m - коэффициент Шези; R - гидравлический радиус трещины; i_0 - уклон дна, совпадающий с уклоном магистральной трещины.

Величина $\frac{dQ}{dx}$, входящая в уравнение (8), выражает изменение расхода струи, проникшей в скелет скального основания вследствие его отдачи через поверхностные трещины в толщу воды нижнего бьефа. Эта отдача выражается зависимостью

$$\frac{dQ}{dx} = -q_{OT} = -\mu\omega_{щ} \sqrt{2g \left(\frac{p}{\gamma_0} - h_H \right)}, \quad (9)$$

где μ - коэффициент расхода трещинных щелей; $\omega_{щ}$ - приведенная площадь поперечного сечения поверхностных трещин, из которых происходит отдача жидкости. При призматической форме отдельностей $\omega_{щ} = \omega/d$; d - ширина отдельности; h_H - глубина воды в нижнем бьефе; q_{OT} - интенсивность оттока воды через трещину.

На основании уравнений (8), (9) в [1] получены формулы для определения расхода струи, проникшей в скелет скального основания, интенсивности фильтрующего потока через поверхностные трещины дна нижнего бьефа и избыточного давления, возникшего в сильно трещиноватом скальном основании вследствие удара струи, сброшенной с высоких уровней. Последнее имеет вид

$$p = p_2^* = \gamma_0 H_D e^{-\frac{g\omega^2}{k^2}x} + \gamma_0 h_H, \quad (10)$$

где $\gamma_0 H_D$ - давление, возникшее в точке удара сброшенного потока о трещиноватое дно нижнего бьефа, зависящее от расхода, перепада между бьефами, степени аэрации, раздробления и угла входа сброшенной струи в нижний бьеф, а также от глубины воды в нижнем бьефе.

Согласно [1], избыточное противодавление, вырывающее скальную отдельность из своего гнезда, уменьшается экспоненциально от точки проникания падающей струи в трещины дна нижнего бьефа, что хорошо согласуется с данными Вызго [2].

Величину H_D можно выразить через полный напор H над уровнем воды в нижнем бьефе по формуле

$$H_D = 2\beta_1\beta_2H, \quad (11)$$

где посредством коэффициентов β_1 и β_2 учитываются соответственно потери напора, возникшие при проникании струи в толщу воды нижнего бьефа, а также дополнительные потери на аэрацию и распад сброшенного потока.

Значение коэффициента β_1 можно определить по зависимости Михалева [3]:

$$\beta_1 = \left(0,9 + \frac{h_H \sqrt{2gH}}{10q \sin \alpha} \right)^{-2}, \quad (12)$$

где h_H - глубина воды в воронке размыва; q - удельный расход сброшенной струи; α - угол входа струи под уровень воды в нижнем бьефе.

Результаты исследования. Принимая, что выброс скальной отдельности из своего гнезда происходит после полного вымывания заполнителя трещин и превращения силы избыточного противодавления на подошву блока в силу лобового обтекания, из условия (5) после несложных преобразований получаем основное расчетное соотношение для определения локальной глубины воронки размыва скального основания:

$$h_p = \frac{10q \sin \alpha}{\sqrt{2g}} \left[\frac{1}{\left[\frac{\gamma_s - \gamma_0}{\gamma_0} \frac{h(\cos \psi + f \sin \psi)}{2c_n(1+2m)} \exp \frac{g}{C_{III}^2 2m} \right]^{1/2}} - \frac{0,9}{\sqrt{\beta_2 H}} \right] - h_H, \quad (13)$$

где c_n - коэффициент лобового обтекания блока; m - коэффициент, учитывающий трещиноватость скального массива.

В целях нормирования коэффициентов, входящих в (13), были использованы данные натуральных наблюдений по размыву трещиноватого скального основания. Установлено, что значения коэффициентов лобового обтекания c_d и кулонова трения f равны 0,7 ($c_d = f = 0,7$). При аэрации и распаде сбрасываемого потока $\beta_2 = 0,8$, а в отсутствие аэрации и распада $\beta_2 = 1$; при толщине скальной отдельности $d > 0,3 м$ - $m = 0,1$, а при $d < 0,3 м$ m рассчитывается по формуле

$$m = \frac{\delta_{mp}}{d}, \quad (14)$$

где δ_{mp} - раскрытие трещины, м.

Коэффициент Шези при турбулентной фильтрации определяется по формуле, данной в [4]:

при $\bar{d} > 0,07 м$ (\bar{d} - диаметр отдельности, приведенной к шару) -

$$C_{Ш} = 10 \left(20 - \frac{0,14}{d} \right) m \sqrt{\bar{d}}; \quad (15)$$

при $\bar{d} < 0,07 м$ -

$$C_{Ш} = 20 - \frac{14}{d}. \quad (16)$$

Формула (13) как с качественной, так и с количественной стороны хорошо соответствует натурным наблюдениям и экспериментальным данным (табл.).

Таблица

Сооружение	Структурный состав нижнего бьефа	Удельный расход, q , $м^2/с$	Перепад между бьефами, H , м	Глубина воды в нижнем бьефе, h_n , м	Угол входа струй в нижний бьеф, α°	Средний размер отдельности, h , м	Глубина воронки размыва h_p , м	
							в натуре	по формуле (13)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Водосливная плотина с носком трамплином [5,6]	Известковый песчаник, $\gamma_s = 2,65$ $\psi = 0$; $m = 0,1$	50	16	4	20°	2,12	13...14	13,3

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ГЭС Наглу на р. Кабул. Сброс воды с консоли с носком [7]	Трещиноватый гранит, $\gamma_s = 2,8$; $\psi = 0$; $m = 0,1$	20	60	18,3	35°	1,0	2...3	2,2
Красноярская ГЭС. водосливная плотина с носком [8]	Трещиноватый гранит, $\gamma_s = 2,7$; $\psi = 0$; $m = 0,1$;	58	90,7	16,3	37°	1,5	40	37,6
Водосливная плотина с носком – трамплином [9]	Бетонные блоки, $\gamma_s = 2,7$; $\psi = 0$; $m = 0,3$; $\delta_{mp} = 2\text{мм}$; $h \times d \times b = 3 \times 6 \times 4\text{см}$;	0,112	0,80	0,26	35°	0,03	0,192	0,199
Водосливная плотина с носком-трамплином [10]	Скала с развитой трещиноватостью, $\gamma_s = 2,7$; $\psi = 0$; $m = 0,1$; $h \times d \times b = 4 \times 8 \times 8\text{м}$;	59	82,5	17,5	53°	4,0	23,8	24,70
Гидравлический лоток [11]	Бетонные блоки, $\gamma_s = 2,65$; $\psi = 0$; $m = 0,06$; $\delta_{mp} = 3\text{мм}$; $h \times d \times b = 5 \times 5 \times 5\text{см}$;	0,029	2,97	0,06	86°	0,05	0,15	0,155

Заключение. Таким образом, расчеты подтвердили предложенный подход к механике размыва скального основания блочной структуры падающими потоками воды.

Литература

1. **Гагошидзе Ш.Н.** Расчет избыточного гидродинамического противодействия в трещиноватом скальном основании блочной структуры // Гидротехническое строительство и вопросы энергетики в горных условиях: Сб. науч.-техн. статей ГрузНИИЭГС. - М.: Энергия, 1981.- С. 70-72.
2. **Вызго М.С.** Эксплуатационные мероприятия, прогнозы и способы уменьшения местных размывов за гидротехническими сооружениями.- Ташкент: Наука, 1976. – С. 159-154.
3. **Михалев М.А.** К вопросу о кинематической структуре потока при сопряжении бьефов по типу отброшенной струи // Труды координационных совещаний по гидротехнике. –М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. - Вып. VII. - С. 407-430.
4. **Избаш С.В., Холдре Х.Ю.** Гидравлика перекрытия русел рек. - М.: Госэнергоиздат, 1954. - 208 с.
5. **Рубинштейн Г.Л.** Лабораторные исследования местного разрушения скалы в нижних бьефах высоких плотин // Труды координационных совещаний по гидротехнике.- 1963. - Вып. VII.- С. 375-394.
6. **Смолянинов Н.Т.** Разрушение скалы в нижнем бьефе плотины падающей струей // Гидротехническое строительство. – 1952.- № 2.
7. **Войнов Ю.П., Прудовский А.М., Смирнов Л.В.** Экспериментальные приемы определения размыва скального русла // Тр. координационных совещаний по гидротехнике. -1969.- Вып. 52.- С. 584-586.
8. **Соловьева А.Г.** Размыв русла за плотинной с носком // Труды координационных совещаний по гидротехнике.- 1963. - Вып. УП. – С. 463-477.
9. **Юдицкий Г.А.** Силовое воздействие падающей струи на отдельность скального основания и условия его разрушения // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 1963.- Т. 72. - С. 35-59.
10. **Юдицкий Г.А.** Моделирование размыва скальных русел за водосливными плотинами с носком трамплином // Тр. координационных совещаний по гидротехнике. -1969. - Вып. 52.- С. 566-575.
11. Разработка методических указаний по размыву трещиноватых скальных оснований: Отчет ГрузНИИЭГС.-Тбилиси, 1979.- №17, ч. II.- 72 с.

*Поступила в редакцию 14.10.2015.
Принята к опубликованию 22.02.2016.*

**ՃԱՔՃՔՎԱԾ ԺԱՅՈՒՅԻՆ ՀԻՄՆԱՏԱԿՈՎ ՊԱՏՎԱՐՆԵՐԻ ՆԵՐՔԻՆ ԲՅԵՖԻ
ՏԵՂԱԿԱՆ ՈՂՈՂՄԱՆ ՀԱՇՎԱՐԿԻ ՎԵՐԱԲԵՐՅԱԼ**

Շ.Ն. Գագոշիձե, Ն.Ա. Խոնելիձե

Զարգացվել է բարձր պատվարներից թափվող ջրային հոսանքով ժայռային ճաքճքված ապարների ողողման ուսումնասիրությունների վերաբերյալ նոր մոտեցում: Ի տարբերություն առկա մեթոդների, որոնք հենվում են, այսպես կոչված, ողողման թույլատրելի արագություն հասկացության վրա, առաջարկվող եղանակը հաշվի է առնում ողողումը պայմանավորող այնպիսի կարևոր գործոններ, ինչպիսիք են ժայռային հիմնատակի բլրկային կառուցվածքը, ճեղքերի լայնացումը, ժայռային առանձին կտորների առաձգական հատկությունները և այլն: Ստացված արդյունքները բավարար ճշտությամբ համապատասխանում են հիմնատակի բլրկային կառուցվածքով ժայռային ճաքճքված ապարների ողողման փորձնական հետազոտությունների և բնական դիտարկումների տվյալներին:

Առանցքային բաներ. ժայռային հիմնատակ, թափվող հոսանք, ճեղքի լայնացում, թափանցելիություն, ժայռային կտորի դուրսնետում:

**CALCULATING THE LOCAL WASHOUT OF DOWNSTREAM WALLS OF
DAMS WITH A CRACKED BEDROCK**

Sh.N. Gagoshidze, N.A. Khonelidze

A new approach to the study of washout of cracked bedrocks by the water flows falling from high dams is developed. In contrast to the existing methods based on the concept of the so-called permissible washout rate, the proposed method takes into account such important factors, conditioning the washout, as are the permeability of the falling stream into the bottom cracks of the downstream wall, the block structure of the rock foundation, the crack opening, the elasticity of the rock parts, etc. The results are in good agreement with experimental data and field observations of the washout of the block structure cracked bedrock.

Keywords: bedrock, thrown stream, crack opening, permeability, release of the rock part.