

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ  
ПРОМЫВКИ ПРИ ЗАДАННЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ НЕСВЯЗАННОЙ  
ГРУНТОВОЙ СРЕДЫ**

**П.О. Балджян**

*Национальный политехнический университет Армении*

В процессе эксплуатации водохранилищ, каналов, отстойников и других русловых гидротехнических сооружений происходит отложение наносов, которые с потоком поступают из верхних участков рек. Распространение этих отложений со временем создает серьезные эксплуатационные проблемы для сооружений и русел. Поэтому мероприятия по смыву и транспортировке потоком воды отложенных наносов имеют важное прикладное значение. Разрушение грунтовой среды и транспортировка (гидравлическая промывка) давно применяются в строительстве и при эксплуатации гидротехнических сооружений. Несмотря на это, научная обоснованность при указанного явления остается на достаточно низком уровне. Отсутствуют теоретические модели по описанию протекающих процессов или расчетные предложения по установлению характеристик, обуславливающие исследуемое явление. С практической и эксплуатационной точек зрения, особенно важны задачи по установлению размываемого расхода потока, объема грунта, размываемого потоком, и продолжительности гидравлической промывки данной грунтовой массы. В работе четко определены краевые условия и дан метод математического описания исследуемого физического процесса. С учетом этих материалов составлено дифференциальное уравнение по балансу массы размываемого и уносимого потоком грунта. Приведены основные результаты аналитических разработок, позволяющие установить взаимосвязь между временем гидравлической промывки, расходом смытого грунта и координатами грунтовой среды. Решение полученного дифференциального уравнения с учетом краевых условий задачи позволяет на заданной стадии смывного процесса рассчитать его продолжительность, а далее и объем смытого потоком грунта. Полученное решение может быть использовано в технических расчетах и эксплуатационных инженерных мероприятиях, проводимых для очистки отложений в отстойных сооружениях, в водохранилищах и в других гидротехнических сооружениях, наполненных наносами.

**Ключевые слова:** водный поток, расход, размыв грунтовой среды, транспортировка наносов, краевые условия.

**Введение.** В ходе эксплуатации водохранилищ, каналов, отстойников и ряда других русловых гидротехнических сооружений происходит отложение в

них наносов, поступающих из верхних участков рек. Аналогичное явление наблюдается и на равнинных участках естественных русел. Увеличение и распространение этих отложений создает серьезные эксплуатационные проблемы для сооружений и русел, а иногда они даже выводят их из строя. С целью восстановления работоспособности каналов и нормализации естественных русел обычно проводятся периодические дноуглубления. Удаление отложений осуществляется механическим или гидромеханическим способом, а иногда путем гидравлического смыва [1-5]. Механический способ в основном применяется для углубления дна равнинных больших рек, гидравлический смыв - для очистки отстойных сооружений и в ряде случаев - каналов. Очистка же водохранилищ от наносовых отложений остается пока еще нерешенной проблемой. Таким образом, задачи, связанные с исследованием гидродинамических процессов, обуславливающих смыв и транспортировку грунта потоком воды, имеют важное прикладное значение.

Отдельные вопросы гидравлического смыва достаточно хорошо изучены и решены. Среди них следует отметить работы по определению скорости трогания частиц грунта и их гидравлической крупности [6,7], выводы формул по расчету расхода наносов или концентрации потоков в различных русловых условиях [8,9] и т.д. Результаты разработок указанных тем были использованы для решения отдельных задач мостовой гидравлики, оросительных каналов, противоселевых сооружений и т.д. Наряду с этим основные вопросы гидравлического смыва еще остаются недостаточно изученными. Отсутствуют предложения, позволяющие прогнозировать важные параметры исследуемого явления. Без этих средств невозможно осуществить управление смывного явления и тем более получить конечный эффективный результат.

**Объект и методика исследования.** Целью работы является установление закономерности изменения объема грунта, уносимого потоком в ходе гидравлического смыва однородной несвязанной грунтовой среды.

Разработки проведены для заданных непризматических границ среды (рис. 1 и 2):

$$0 < x \leq L; H_0 \leq Z \leq H; B_0 \leq 2y \leq B,$$

где соотношения  $H_0/H$  и  $B_0/B$  могут быть больше или меньше единицы.

В указанных условиях над грунтовой средой или отсутствует движущийся поток, или поток имеет такие параметры движения, при которых поверхность грунтовой среды остается в устойчивом состоянии. Одновременно имеющееся в начальном сечении (точка "0") заграждение с высотой  $H_0$  (рис. 2) не позволяет потоку смыть грунт с этого фронта.

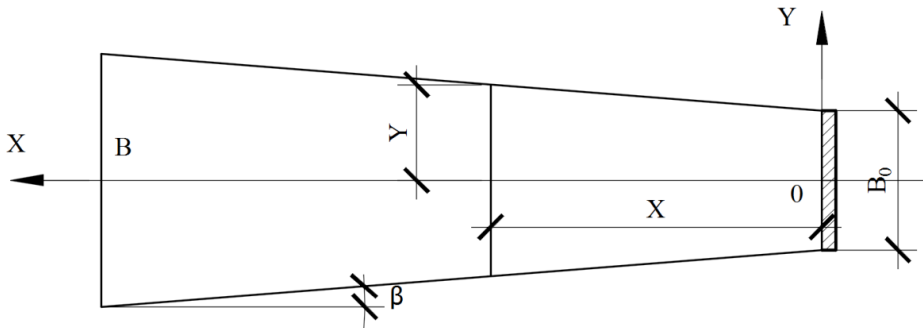


Рис. 1. Схема грунтовой среды в плане

Представленная схема грунтовой среды в основном имеет место в равнинных участках рек (зона отложений), водохранилищах, отстойных и водозаборных сооружениях, установленных на водостоках предгорной и горной зон [2,4,5].

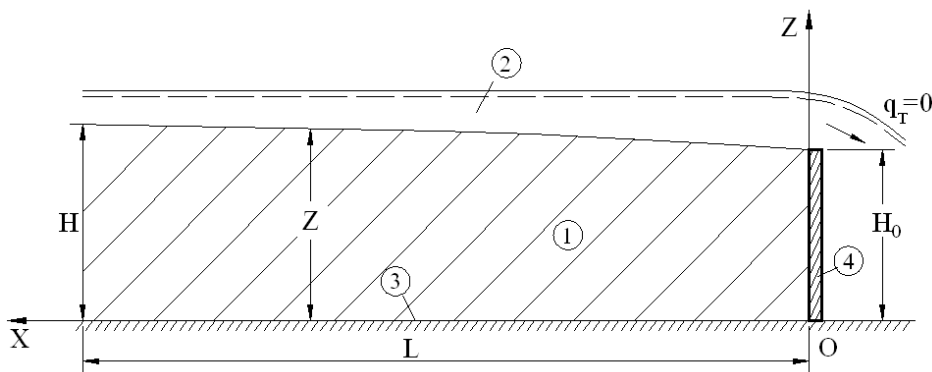


Рис. 2. Схема устойчивого положения грунтовой среды в продольном разрезе:  
1- однородная грунтовая среда, 2 - область движения потока, 3 – нижняя граница среды, 4 - заграждение (граничное условие)

Принятая система координат и положительное направление  $x$  (против течения) указаны на рис. 1 и 2. Для простоты поперечное сечение среды в плоскости  $ZOY$  принято прямоугольным. Постановка задачи и ряд положений приведены в работах [10, 11].

Предположим, что вначале ( $t = 0$ ) заграждение 4 (рис. 2) мгновенно убирается. Вследствие этого в данном створе нарушается устойчивость среды: начинается смыв и унос грунта. При этом имеем следующие граничные условия в створе заграждения:

- до начала размыва:

$$x = 0, \quad y = \pm \frac{B_0}{2}, \quad z = H_0 \quad \text{и} \quad q_T = 0, \quad \text{где } q_T - \text{расход грунта,}$$

унесенного потоком;

- на начальной стадии размыва:

$$x = 0, \quad y = \pm \frac{B_0}{2}, \quad z = 0 \quad \text{и} \quad q_T \neq 0.$$

При заданных параметрах, с учетом граничных условий, составлена математическая модель, позволяющая в зависимости от времени и расстояния установить закономерности изменения геометрических и гидравлических характеристик грунтовой среды и потока.

**Результаты исследования.** Гидравлический размыв в практике может происходить как по всему фронту грунтовой среды  $B_0$  (т.е.  $y = \pm \frac{B_0}{2}$ ), так и на одном или нескольких участках этого фронта. Обозначив ширину участка размыва  $b_0$ , можем написать, что  $\sum b_0 < B_0$ . В этом случае разрушение и унос грунта, естественно, будут обусловлены параметрами смывного потока и размерами этих участков. При этом по направлению движения потока (ось  $x$ ) в грунтовой среде, в зависимости от количества размывных участков, будет образовано одно или несколько русел. В указанном варианте гидравлического смыва меняются и граничные условия, и пределы интегрирования, однако в принципиальном отношении ход решения не будут существенно отличаться от варианта, в котором размыв происходит по всему фронту.

Необходимо отметить, что в общей постановке задачи характерные параметры смыва и уноса грунта меняются в зависимости от координат  $x, y, z$  и  $t$ . Обозначив в момент времени  $t = t_k$  расход смытого потоком грунта  $q_T$ , уравнение объемного баланса за элементарный промежуток времени  $dt$  представим в виде

$$q_T dt = \rho_T dW, \quad (1)$$

где  $\rho_T$  - плотность грунта;  $dW$  - элементарный объем смытого грунта (рис. 3).

Для установления элементарного объема рассмотрим взаимосвязь координат  $x, y, z$ . Согласно рис.1 и 3, имеем

$$y = \frac{B_0}{2} \pm x \operatorname{tg} \beta, \quad (2)$$

$$z = H_0 \pm x \operatorname{tg} \gamma, \quad (3)$$

где  $\beta$  - угол расширения (сужения) боковых стен грунтовой среды;  $\gamma$  - угол наклона поверхности этой среды. В соответствии с этим увеличиваются или уменьшаются координаты  $y$  и  $z$  по направлению  $+x$ , выбираются знаки “плюс” или “минус”.

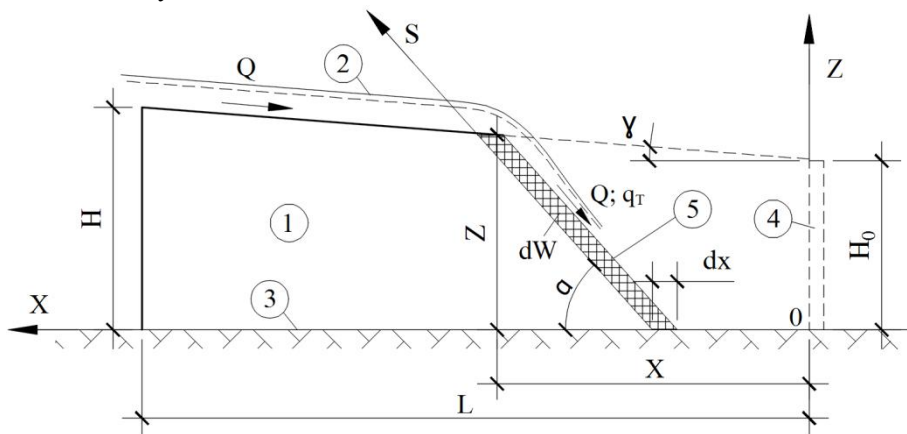


Рис. 3. Продольная схема гидравлического смыва грунтовой среды: 1 - однородный грунт; 2 - смывающий стационарный поток; 3 - нижняя граница грунтовой среды; 4 - начальный смывной фронт; 5 - текущий смывной фронт

Зависимости (2) и (3) получены для случая, когда боковые контуры грунтовой среды меняются по линейным законам. Нетрудно получить аналогичные зависимости и для других форм изменения этих контуров.

Для элементарного объема смываемого грунта имеем

$$dW = 2 y_{cp} S \sin \alpha dx = 2 y_{cp} z dx, \quad (4)$$

где  $S$  - координата наклонной поверхности смывного фронта;  $2 y_{cp}$  - средняя ширина этого фронта в точке  $x - \frac{z}{2} \operatorname{ctg} \alpha$  (ось  $x$  проходит по середине грунтовой среды (рис. 1 и 3)).

С учетом зависимости (2) и рис.1 имеем

$$y_{cp} = \frac{B_0}{2} + \left(x - \frac{z}{2} \operatorname{ctg} \alpha\right) \operatorname{tg} \beta. \quad (5)$$

Тогда для элементарного объема получим

$$dW = 2 \left[ \frac{B_0}{2} + \left(x - \frac{z}{2} \operatorname{ctg} \alpha\right) \operatorname{tg} \beta \right] z dx. \quad (6)$$

С учетом выражения (6) уравнение баланса (1) представим в виде

$$q_T dt = 2 \rho_T \left[ \frac{B_0}{2} + \left(x - \frac{z}{2} \operatorname{ctg} \alpha\right) \operatorname{tg} \beta \right] z dx. \quad (7)$$

Из совместного решения уравнений (3) и (7) получим

$$dt = 2 \frac{\rho_T}{q_T} \left[ \frac{B_0}{2} + \left(x - \frac{H_0 + x \operatorname{tg} \gamma}{2} \operatorname{ctg} \alpha\right) \operatorname{tg} \beta \right] (H_0 + x \operatorname{tg} \gamma) dx. \quad (8)$$

При заданной постановке задачи решение дифференциального уравнения (8) позволяет установить время, определяющее местоположение фронта гидравлического смыва.

В данном уравнении значения параметров  $\rho_T$ ,  $H_0$  и  $B_0$ , а также углов  $\beta$  и  $\gamma$ , как исходные, заданы условиями задачи. Что касается расхода транспортируемого потоком грунта  $q_T$  и угла  $\alpha$ , то отметим следующее. Для расчета  $q_T$  предложено значительное количество формул, но ни одна из них не имеет достаточного основания надежности. Подробный анализ этих формул приведен в работах [9,12-13]. Исходя из этого, можно подобрать более или менее подходящую формулу по расчету расхода грунта, уносимого потоком. Относительно угла наклона смываемого фронта  $\alpha$  отметим, что, согласно существующим немногим натурным наблюдениям [13], этот угол в процессе смыва может оставаться неизменным или уменьшаться по отношению к его первоначальному значению. Соответственно, будет меняться и величина расхода грунта, уносимого потоком. Поведение обеих величин формируется взаимодействием потока и грунтовой среды. Во всяком случае, решение данной задачи требует отдельного экспериментального и натурального исследования.

Уравнение (8) можно представить в виде безразмерных линейных величин. Принимая за масштаб безразмерности величину  $L$ , получим

$$dt = 2 \frac{\rho_T}{q_T} L^3 \left[ \frac{B_0}{2L} + \left(\bar{x} - \frac{\frac{H_0}{L} + \bar{x} \operatorname{tg} \gamma}{2} \operatorname{ctg} \alpha\right) \operatorname{tg} \beta \right] \left(\frac{H_0}{L} + \bar{x} \operatorname{tg} \gamma\right) d\bar{x}, \quad (9)$$

где  $\bar{x} = \frac{x}{L}$  – безразмерная координата, меняющаяся в интервале  $0 < x \leq 1$ .

Нетрудно убедиться, что размерности левой и правой частей уравнения (9) соответствуют друг другу.

На практике, естественно, главной задачей является определение времени полного или частичного смыва отложившихся наносов, грунтов. Эта задача при заданных исходных величинах  $\rho_T$ ,  $L$ ,  $H_0$ ,  $B_0$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  решается следующим образом: выбирается формула по расчету расхода  $q_T$  [9,12], затем для

различных значений  $\bar{x}$  с помощью компьютерной программы вычисляются соответствующие значения продолжительности смыва  $t$ . Дифференциальное уравнение (9) можно решить также вручную, используя численный метод Рунге–Кутты.

В гидравлическом смыве наряду с расчетом времени часто возникает необходимость контролировать смывной процесс. Очевидно, что на длительность гидравлического смыва, кроме размеров грунтовой среды, большое влияние оказывает и расход грунта, уносимого потоком. Изменением его значения можно достичь управляемости хода смывного процесса. Решение данного вопроса обусловлено возможной варьированностью структуры формулы, выбранной для расчета расхода наносов.

**Заключение.** Таким образом, путем решения уравнений (8) или (9) для различных стадий гидравлического смыва можно установить время достижения этой стадии, а следовательно, и объем смытого и уносимого потоком грунта во временном пространстве. Полученное решение может быть использовано в технико-экономических расчетах и эксплуатационных мероприятиях, проводимых для очистки отложений наносов в отстойниках и в верхнем бьефе различных русловых сооружений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного комитета по науке при Министерстве образования и науки Республики Армения в рамках тематики научно-исследовательской базовой лаборатории "Гидротехника" Национального политехнического университета Армении.*

#### Литература

1. **Бессонов Е.А.** Технология и механизация гидромеханизированных работ: Справочное пособие. – М.: Изд.центр, 1999. – 544 с.
2. СП 58.13330.2012 – Гидротехнические сооружения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003.
3. **Бадур Х., Кноблаух Г., Шнайдер Й.** Граничные условия при организации промывки, препятствующей заилению ГЭС Бодэндорф // Гидротехнические сооружения / Европейский технический институт.– 2008.– С. 42 – 45.
4. **Михайлов И.Е.** Расчет отстойников с периодическим удалением осевших наносов // Гидротехническое строительство. -М., 2005. - №5. - С. 22 - 28.
5. **Чернова Д.А., Лемешев А.И.** Гидравлическая очистка русел малых рек от наносов // Вестник Башкирского аграрного университета. - 2008. - №11. - С. 20 – 21.
6. **Клавен А.Б., Копалиани З.Д.** Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и русловых процессов. - СПб: Нестор-История, 2011. – 504 с.

7. **Желязняков Г.В., Пейч Ю.Л.** Начальная стадия деформации русел // Метереология и гидрология. -1995.-№10. - С. 77-84.
8. **Великанов Н.Л., Наумов В.А.** Взвешенные частицы в водотоке и их осаждение // Вода: химия, экология. -2014.-№2. - С. 114-119.
9. **Юфин А.П.** Движение наносов и гидравлический транспорт. - М., Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 199с.
10. **Балджян П.О., Балджян В.П.** Математическое описание процесса смыва потоком несвязанного однородного грунта // Сб.тр. 5-й Межд. н/т конференции “Современные проблемы водного хозяйства”. - Тбилиси, 2015.- С.13-16.
11. **Балджян В.П., Ероян Е.П., Оганесян Г.С.** О методе гидравлического смыва однородного грунтового слоя // Вестник НПУА: Гидрология и гидротехника. - 2015.-N2. - С. 69-74.
12. **Балджян П.О.** Определение зависимости между гидравлическими параметрами потоков при постоянстве их наносонесущей способности // Известия НАН РА и ГИУА. Серия ТН. -2005. -Т. 58, N. 2.– С. 380 - 385.
13. **Балджян П.О., Токмаджян Л.О.** Результаты натурных исследований головного гидроузла Армавирского канала “Кара-Кала” на р. Аракс// Сб. науч. труд. ИВХ Грузии.- Тбилиси, 2010.-N 65.- С. 21-22.

*Поступила в редакцию 17.02.2017.  
Принята к опубликованию 14.06.2017.*

## **ՀԻՊՐԱՎԼԻԿԱԿԱՆ ԼՎԱՑՄԱՆ ՏԵՎՈՂՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՈՒՄԸ ՉԿԱՊԱԿՑՎԱԾ ԳՐՈՒՆՏԱՅԻՆ ՄԻՋԱՎԱՅՐԻ ՏՐՎԱԾ ԲՆՈՒԹԱԳՐԻՉՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ**

### **Պ.Հ. Բալջյան**

Ջրամբարների, ջրանցքների, պարզարանների և գետային հիդրոտեխնիկական մյուս կառուցվածքների շահագործման ընթացքում տեղի են ունենում ջրաբերուկների կուտակումներ, որոնք հոսանքով բերվում են գետի վերին տեղամասերից: Ժամանակի ընթացքում այդ նստվածքների տարածումը կառուցվածքներում և հուններում ստեղծում է շահագործողական լուրջ խնդիրներ: Այդ պատճառով էլ կուտակված ջրաբերուկների ողողման և ջրի հոսանքով տարհանման միջոցառումներն ունեն կարևոր կիրառական նշանակություն: Գրունտային միջավայրի քայքայումն ու տեղափոխումը (հիդրավլիկական լվացում) վաղուց է կիրառվում հիդրոտեխնիկական կառուցվածքների շինարարության և շահագործման գործընթացներում: Չնայած դրան՝ անբավարար է նշված երևույթի գիտական հիմնավորվածությունը: Չկան վերոհիշյալ գործընթացները նկարագրող մաթեմատիկական մոդելներ կամ հետազոտվող երևույթը պայմանավորող բնութագրերի որոշման հաշվարկային առաջարկներ: Գործնական և շահագործողական տեսակետից առանձնապես կարևոր են այն խնդիրները, որոնք առնչվում են ողողող հոսանքի ելքի, ողողվող գրունտի քանակի և հիդրավլիկական լվացման տևողության որոշմանը: Աշխատանքում ներկայացված է խնդրի դրվածքը, սահմանված են եզրային պայմանները, և բերված է հետազոտվող ֆիզիկական երևույթի մաթեմատիկական նկարագրման մեթոդը: Հաշվի առնելով այդ նյութերը՝ կազմվել է ողողված և հոսանքով տարված գրունտի քանակի



հաշվեկշռի դիֆերենցիալ հավասարումը: Ներկայացված են նաև տեսական մշակումների հիմնական արդյունքները, որոնք հնարավորություն են տալիս ստանալ կախվածություն հիդրավիկական լվացման ժամանակի, լվացվող գրունտի ելքի և գրունտային միջավայրի կորոդինատների միջև: Ստացված դիֆերենցիալ հավասարման լուծումը, հաշվի առնելով խնդրի եզրային պայմանները, թույլ է տալիս լվացման գործընթացի տվյալ պահին հաշվարկել լվացման տևողությունը, ապա նաև հոսանքով ողողված գրունտի ծավալը: Ստացված լուծումը կարող է կիրառվել տեխնիկական հաշվարկներում և շահագործման ինժեներական միջոցառումներում, որոնք կատարվում են ջրաբերուկներով լցված պարզարանային կառուցվածքները, ջրամբարները և հիդրոտեխնիկական այլ կառուցվածքները կուտակումներից մաքրելու համար:

**Առանցքային բաներ.** ջրային հոսանք, ելք, գրունտային միջավայրի ողողում, ջրաբերուկների տեղափոխում, եզրային պայմաններ:

## **DETERMINING THE DURATION OF HYDRAULIC FLUSHING AT SPECIFIED CHARACTERISTICS OF UNRELATED SOIL GROUND**

**P.H. Baljyan**

In the process of operation of reservoirs, canals, sedimentation structures and other channel hydrotechnical structures, sediments are deposited, which flow from the upper sections of the rivers with the flow. The spread of these deposits creates serious operational problems for structures and beds with time. Therefore, the measures for flushing and transporting the deposited sediment with water are of great practical importance. The destruction of the soil ground and the transportation (hydraulic flushing) are used in the construction and operation of hydraulic structures. Despite this, the scientific validity of this phenomenon remains at a fairly low level. There are no theoretical models for describing the ongoing processes, or estimates for determining the characteristics that determine the phenomenon under investigation. From a practical and operational point of view, the most important tasks are those that determine the eroded flow rate, the volume of the ground blurred by the flow, and the duration of hydraulic flushing of this ground mass. The formulation of the problem is presented, the boundary conditions are clearly defined, and the method of mathematical testing of the physical process under study is given. Taking into account these materials, a differential equation is calculated for the balance of the soil mass washed out and carried away by the flow. The main results of analytical development, allowing to establish the relationship between the time of hydraulic flushing, the discharge of washed-out soil and the coordinates of the soil ground are introduced. The solution of the obtained differential equation, taking into account the boundary conditions of the problem, allows to calculate its duration at a given stage of the flushing process, and then the volume of the ground washed away by the flow. The solution obtained can be used in technical calculations and operational engineering measures to clean sediments in sedimentation facilities, reservoirs and other hydraulic structures filled with sediments.

**Keywords:** water flow, consumption, flushing of soil ground, transportation of sediment, boundary conditions.