

РАСЧЁТ ОБЩЕГО РАЗМЫВА КАНАЛА В СВЯЗНЫХ ГРУНТАХ

Бобомуродов Фуркат Фарход угли

кандидат технических наук (PhD), доцент.

ORCID: 0009-0002-0055-6343 E-mail: furqatbobomurodov709@gmail.com

Хазратов Алишер Рахматилло угли – преподаватель.

ORCID: 0009-0003-8764-1125 E-mail: alisherhazratov5354@gmail.com

Кувватов Жобирбек Зокиржон угли – независимый исследователь

Салимов Файзулла Сайдулла угли – магистрант.

Каршинский инженерно-экономический институт, г. Карши, Узбекистан.

Аннотация. В данной статье рассматриваются основные теоретические и практические аспекты расчета процессов общего размыва в каналах, сложенных связными грунтами. Изучены динамика насыщения потока частицами, а также зависимость этого процесса от скорости потока, концентрации наносов и физических свойств грунта. Проведен комплексный анализ параметров, таких как гидрологический режим, рельеф местности, геологическое строение и другие факторы, влияющие на формирование каналов. Описаны механизмы отделения грунта под воздействием турбулентного потока и эмпирические закономерности данного процесса. В результате исследования предложены математические модели и методики расчета, направленные на оценку размывных процессов в связных грунтах. Кривую свободной поверхности рассчитали с использованием номограмм, разработанных по методике «Гидропроект». Также определены гидравлические параметры канала и выполнено восстановление его профиля на основе этой методики.

Ключевые слова: *связные грунты, размыв каналов, динамика мутности, турбулентный поток, математическое моделирование, эмпирические зависимости, профиль канала.*

Введение

В настоящее время рациональное управление и эффективное использование водных ресурсов стали актуальными проблемами. В частности, исследование общих процессов размыва в каналах, сложенных связными грунтами, играет ключевую роль в обеспечении устойчивости гидротехнических сооружений. Воздействие потока воды на структуры канала, устойчивость грунта к размыву и анализ гидравлических условий необходимы для повышения эффективности эксплуатации каналов и сохранения природных ресурсов.

Каналы, сложенные связными грунтами, широко распространены в природе, и процессы размыва в них влияют не только на устойчивость гидротехнических сооружений, но и на экологическое состояние водных путей. Поэтому данная тема имеет не только научную значимость, но и практическое значение, играя важную роль в разработке стратегий управления водными ресурсами.

Размыв канала и насыщение потока взвешенными частицами происходят, когда мутность потока ниже его транспортной способности. Этот процесс осуществляется, когда скорость потока в канале достаточно велика, чтобы либо поднять частицы в суспензию (в несвязанной почве), либо вызвать отсоединение агрегатов (в связных грунтах). В песчаных, несвязанных грунтах сопротивление размыву частиц в первую очередь определяется их весом и силами трения между ними. В связных грунтах основным фактором, обеспечивающим сопротивление размыву, является связующая прочность грунта[1].

Размыв связных грунтов происходит в виде агрегатов, при этом отсоединенные фрагменты обычно имеют размер около 3-5 мм[2]. Отсоединение агрегатов связного грунта в первую очередь связано с динамическим воздействием турбулентного потока[3]. Этот процесс зависит от скоростей потока, наблюдаемых на момент начала деформации в потоке, и того, насколько эти скорости превышают допустимые скорости потока для данных грунтов[4].

Особенностью связных грунтов является их способность сопротивляться размыву благодаря прочности на растяжение, которая обусловлена структурными связями между частицами[5]. Главным фактором, который обеспечивает прочность грунтов, является стабильность этих структурных связей.

Структурные связи имеют сложную природу и зависят от совокупности внешних и внутренних энергетических полей, действующих в грунте, в первую очередь определяемых молекулярными электромагнитными силами.

Для приближенного расчета соотношение между скоростью насыщения потока взвешенными частицами и дефицитом мутности можно выразить через следующее уравнение:

$$\frac{g_x}{\rho_{кр} - \rho_x} = \frac{\alpha(g_{\Delta\phi ak} - g_{\Delta a on})}{\rho_x} \quad (1)$$

Скорость насыщения потока можно выразить в следующей форме[4]:

$$g_x = \alpha(g_{\Delta\phi ak} - g_{\Delta a on}) \frac{\rho_{кр} - \rho_x}{\rho_x} \quad (2)$$

где $g_{\Delta\phi ak}$ - донная скорость в потоке, м/с;

$\mathcal{G}_{\Delta\alpha_{on}}$ - донная неразмывающая скорость для данного грунта, м/с;

ρ_{kp} - мутность, которую поток способен транспортировать, кг/м;

ρ_x - мутность потока на расстоянии x от начала размыва, кг/м;

α - эмпирический коэффициент, характеризующий длину насыщения потока взвесьями при размыве русла и зависящий от прочностных свойств грунта русла.

Методы и материалы

Скорости потока на дне определяются с использованием известной формулы В.Н. Гончарова, в то время как средняя критическая скорость рассчитывается по формуле С.Э. Мирцхулавы для связных грунтов[1].

Уравнение, описывающее динамику насыщения потока взвешенными частицами для связных грунтов, основывается на предположении о полном размыве канала, полученном из следующих условий и допущений:

- Расчет проводится при одинаковых условиях;
- Скорость отсоединения агрегатов остается постоянной в течение определенного временного интервала, исходя из гидравлических параметров потока;
- Разделение агрегатов на мелкие фракции происходит на относительно небольшом участке пути насыщения взвешенными частицами.

Рассмотрим участок потока длиной dx глубиной H и шириной B . Если мутность потока увеличивается в единицу времени на $\frac{d\rho_x}{dx}$ то количество взвеси, поступающее в объем русла $H \cdot B \cdot dx$ можно выразить зависимостью: [6]

$$dg_x = H \cdot B \cdot dx \frac{d\rho_x}{dt} = H \cdot B \cdot \mathcal{G} \cdot d\rho_x \quad (3)$$

Если насыщение потока взвесьями происходило при некоторой скорости насыщения \mathcal{G}_x м/с, то при наличии в потоке в данный момент мутности ρ_x в поток с площади $dx \cdot B$ поступило бы дополнительное количество взвеси

$$dg_x = \rho_x \cdot \mathcal{G}_x \cdot B \cdot dx$$

или, заменив \mathcal{G}_x на его значение из уравнения (2) :

$$dg_x = \alpha(\mathcal{G}_{\Delta\phi_{ax}} - \mathcal{G}_{\Delta g_{on}})(\rho_{kp} - \rho_x) \cdot B \cdot dx \quad (4)$$

Приравнявая выражения (3) и (4) и учитывая, что

$$d\rho_x = -d(\rho_{kp} - \rho_x) \text{ получим:}$$

$$-HB\mathcal{G}d(\rho_{kp} - \rho_x) = \alpha(\mathcal{G}_{\phi_{ax}} - \mathcal{G}_{\delta_{on}})(\rho_{kp} - \rho_x)B \cdot dx. \quad (4')$$

Отсюда:

$$\frac{d(\rho_{kp} - \rho_x)}{\rho_{kp} - \rho_x} = -\frac{\alpha(\mathcal{G}_{\phi_{ax}} - \mathcal{G}_{\delta_{on}})}{\mathcal{G} \cdot H} dx \quad (5)$$

Интегрируем:

$$\int_0^{\rho_{kp}} \frac{d(\rho_{kp} - \rho_x)}{\rho_{kp} - \rho_x} - \frac{\alpha(\mathcal{G}_{\text{фак}} - \mathcal{G}_{\text{дон}})}{\mathcal{G} \cdot H} \int_0^l dx \quad (6)$$

При $x=0$, $\rho_x = \rho_0$, при $x=l$, $\rho_x = \rho_l$

где ρ_0 , ρ_l - мутность во входном и выходном створах соответственного.

$$\frac{\alpha(\mathcal{G}_{\text{фак}} - \mathcal{G}_{\text{дон}})l}{\mathcal{G} \cdot H}$$

$$\rho_l = \rho_{kp} - (\rho_{kp} - \rho_0) \cdot l \quad (7)$$

В потоке с ограниченной шириной глубину необходимо заменить на гидравлический радиус в уравнении.

Уравнение (7) описывает динамику насыщения потока взвешенными частицами в связных грунтах при условии равномерного потока[7]. В случае неравномерного потока его делят на несколько участков по длине, каждый из которых рассматривается как равномерный поток, и расчеты выполняются поочередно для каждого из них.

Результаты и обсуждения

В самой общей форме уравнение для динамики насыщения можно записать следующим образом:

$$\frac{\alpha(\mathcal{G}_{\Delta\text{фак}(n)} - \mathcal{G}_{\Delta\text{дон}(n)})l_n}{\mathcal{G}_{(n)} \cdot H_{(n)}} \quad (8)$$

$$\rho_{l(n)} = \rho_{kp(n)} - (\rho_{kp(n)} - \rho_{l(n-1)}) \cdot l$$

где $\rho_{l(n)}$, $\rho_{l(n-1)}$ - мутность расчетного и предшествующего участков, кг/м³;

$\mathcal{G}_{(n)}$, $H_{(n)}$ - средние скорость (м/с) и глубина (м) на расчетном участке;

$\rho_{kp(n)}$ - критическая мутность или транспортирующая способность потока на расчетном участке.

Эмпирический коэффициент был определён в ходе исследований связных грунтов, проведённых в лабораториях ВНИИГ и М[8]. На основе обработки экспериментальных данных была получена следующая зависимость:

$$\alpha = 0,000175K \left(\frac{c}{\gamma_w \cdot h^*} \right), \quad (9)$$

где K - коэффициент, характеризующий дополнительный размыв берега. При $C < 0,12$ кг/см² $K = 1,2-1,3$ в случае $C > 0,12$ $K = 1$;

C - среднее сцепление грунта (кг/см²) в состоянии полного водонасыщения;

γ_w - объемная масса грунта, т/м³;

h^* - толщина грунтового слоя, приведенная к 1м.

Транспортирующая способность потока определяется по Формуле Шапиро Х.Ш. Для одной фракции она имеет вид:

$$\rho_{mpi} = \rho_{kp(n)} = K_i \mathcal{G}_{cрак}^{0.7} \cdot U_b [l_n (\frac{W_i + 1}{W_i} - \frac{W_{i+1} - W_i}{U_b})] \quad (10)$$

где K_i - коэффициент, зависящий от диаметра фракции;

U_b - вертикальная взвешивающая способность потока $U_b = 0,3\sqrt{H_{gi}}$

i - уклон дна;

W, W_{i+1} - минимальная и максимальная гидравлические крупности наносов данной фракции.

Значения гидравлических параметров определяются по данным таблицы В.Н. Гончарова. Общая транспортная способность потока вычисляется как сумма транспортных способностей отдельных фракций[6].

Анализ уравнения (8) показывает, что главными факторами, влияющими на интенсивность деформации канала, являются скорость потока и соотношение этой скорости с критической для конкретного грунта. Эти два параметра учитывают влияние потока, рельефа, геологии и других факторов, которые совместно формируют канал.

Учитывая изменения мутности на основе участков, рассчитанных по уравнению (8), объем размытых грунтов можно вычислить с использованием следующей формулы:

$$W_{разм(n)} = \frac{[\rho_{l(n)} - \rho_{l(n-1)}] \cdot Q \cdot t}{\gamma_{об}} m^3, \quad (11)$$

где Q - расход за интервал времени, м³/с;

t - число секунд в выбранном интервале времени.

При выборе временных интервалов необходимо учитывать следующие факторы: предполагается, что гидравлические параметры потока остаются неизменными в пределах выбранных интервалов, что не всегда соответствует действительности. Поэтому выбор более мелких интервалов позволяет уменьшить среднюю ошибку. С другой стороны, слишком маленькие интервалы могут привести к таким малым деформациям, которые могут быть сопоставимы с ошибкой в расчетах. Кроме того, выбор временных интервалов влияет на количество шагов расчета, а значит, и на трудозатраты. Поэтому подход к выбору интервалов должен быть рациональным, но не должен ухудшать точность.

Глубину размыва для рассчитанного участка можно определить по следующему выражению:

$$h_{разм} = \frac{W_{разм(n)}}{B_{cp(n)} \cdot l_{(n)}} \quad (12)$$

С учетом начальной высоты дна канала, глубина размыва для каждого участка определяется путем вычитания $h_{разм}$, что позволяет построить новый профиль канала. После этого вычисляется новая кривая свободной поверхности, определяются новые глубины воды, а затем на основе этих данных рассчитываются новые скорости потока. Эти обновленные гидравлические параметры будут использоваться как исходные данные для дальнейших расчетов канала и потока[9].

В связных грунтах взаимодействие частиц происходит через гидратационно-ионно-коллоидные мембраны, обладающие определенной вязкостью и механической прочностью, которые обеспечивают сцепление грунтов. Прочность таких грунтов увеличивается по мере их высыхания.

Сцепление связных грунтов также обусловлено электростатическим притяжением между частицами, заряженными различными типами зарядов, или вследствие трения между частицами[10].

В некоторых связных грунтах важную роль в прочности играет образование кристаллических (твердых) связей при осаждении солей из растворов.

Сжимаемость грунтов при ограниченных условиях расширения проявляется в результатах испытаний на сжатие, которые дают информацию о сжимаемых свойствах грунтов и позволяют определить их степень сжатия.

Коэффициент сжимаемости (консолидации), общий модуль деформации $УЕ_0$ (кгс/см²), а также модуль осадки, который показывает величину осадки в миллиметрах после приложения нагрузки R (кгс/см²) к 1-метровой колонне грунта, служат показателями сжимаемой способности грунта. Для сильно сжимаемых грунтов коэффициент консолидации больше 0.1 м; для умеренно сжимаемых грунтов он колеблется от 0.1 до 0.01, а для слабо сжимаемых грунтов — от 0.01 до 0.001 и менее. Н.Н. Маслов классифицирует грунты в зависимости от их сжимаемости.

Таблица 1

Классификация грунтов по сжимаемости.

Классификация грунтов по сжимаемости.	Степень сжимаемости грунтов.	R, кгс/см²	V, мм/мин
0	Очень редкий	0,001	1
I	Слабый	0,0001...0,005	1...5
II	Средний	0,005...0,01	5...20
III	Высокий	0,01...0,10	20...60

IV	Сильный	0,20	60
----	---------	------	----

Медленный процесс уплотнения в глинистых грунтах обусловлен структурно-адсорбционными и структурными деформациями. Структурно-адсорбционные деформации происходят только в водных пленках на точках контакта частиц, в то время как структурные деформации связаны с перемещением частиц или агрегатов относительно друг друга. Под нагрузкой общая деформация глинистых грунтов является результатом сочетания обратимых (упругих) и необратимых (остаточных) осадков.

Влияние структурных деформаций на общую деформацию зависит от плотности грунта. При плотности около 0,7 преобладают структурные деформации, в то время как в более плотных грунтах структурно-адсорбционные деформации становятся более значимыми, при плотности между 0,7 и 0,25.

Уплотнение связных грунтов определяется множеством факторов, таких как текстура, структурная прочность и консистенция, минералогический и гранулометрический состав, способность к обмену катионов, состав обменных катионов, минерализация паровых растворов и пористость.

Поскольку процессы размыва в связных грунтах необратимы, с увеличением расходов деформации нарастают, а с уменьшением - не изменяются, расчет деформаций проводился на максимальный расход $Q = 320 \text{ м}^3 / \text{с}$, допустимые скорости, соответствующие этому расходу $g_{\text{con}} = 1,08 \text{ м} / \text{с}$, фактические скорости в русле при этом $g_{\text{фак}} = 1,4 \text{ м} / \text{с}$.

Расчёт начинается с построения кривой свободной поверхности. Канал делится на участки, и расчёт кривой свободной поверхности осуществляется с использованием номограмм, основанных на методологии Гидропроекта.

$$\Delta z = f(ng\sqrt{e}, H - \frac{\Delta h}{2}),$$

где Δz - искомое приращение уровня воды на верхнем створе по сравнению с уровнем на нижнем,

H - средняя глубина воды,

Δh - разность между отметками дна в верхнем и нижнем створах,

g - Удельный расход воды,

n - коэффициент шероховатости.

Расчёт проводится снизу вверх. После того как построена кривая свободной поверхности, можно определить гидравлические параметры потока по каналу и затем рассчитать размывы, используя описанную методику.

Для проверки точности расчёта, выполненного по этой методике, был проведён альтернативный расчёт. Этот метод основан на логической оценке, предполагающей, что размыв в канале будет продолжаться неизменно. Согласно

этой оценке, размыв прекращается, если в канале устанавливаются такие глубины, которые обеспечивают скорость потока, не приводящую к размыву. В этом расчёте не учитывается временной фактор, однако конечный результат должен быть верным — новый профиль канала, соответствующий неразмывным скоростям. Если скорости должны снизиться с 1,4 м/с до 1,08 м/с, начальная глубина должна увеличиться с 2 м до 2,9 м. Однако увеличение глубины немного превышает допустимую скорость, но это увеличение настолько незначительно, что в расчётах оно может быть проигнорировано.

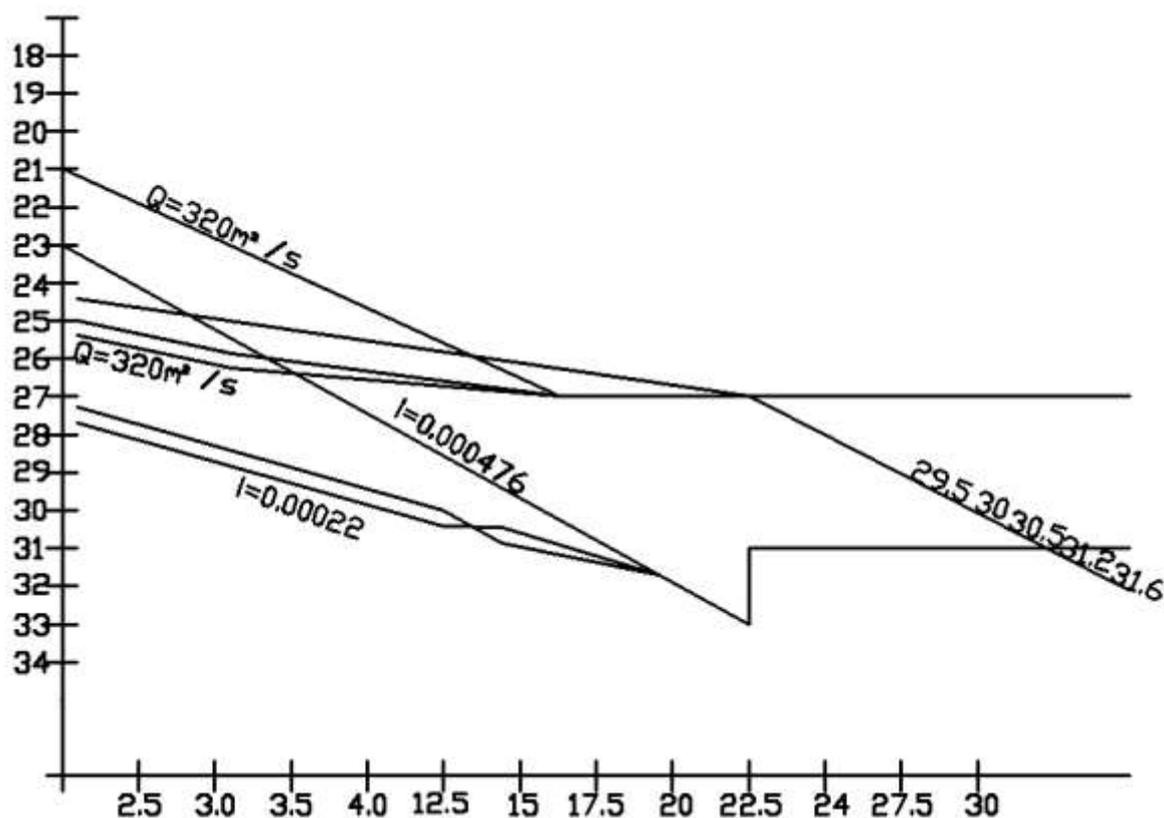


Рис. 1. Изменение уровня дна вдоль длины канала.

Заклучения

Рассматривая процесс как повторяющийся эрозионный процесс, мы передавали глубину 2,9 м через расчёты от участка к участку, корректируя кривую свободной поверхности на каждом этапе. Окончательные результаты были интегрированы в исходный профиль канала (Рисунок 1), и также были размещены точки, полученные с использованием вышеупомянутого метода. Сходные результаты, полученные обоими методами, являются весьма удобными, поскольку метод допустимой скорости, несмотря на отсутствие преимуществ первого метода (учёт процесса эрозии во времени), может служить

подтверждением точности расчётов, так как итоговый результат не оставляет сомнений.

Литература

- [1] Б. В. Степанович and В. М. Анатольевич, “Размыв речного русла в грунтах, обладающих сцеплением,” *Вестник МГСУ*, no. 4, Art. no. 4, 2013.
- [2] “Справочник по гидравлическим расчетам. Киселев П.Г. (ред.). 1972 | Библиотека: книги по архитектуре и строительству | Totalarch.” Accessed: Nov. 21, 2024. [Online]. Available: https://books.totalarch.com/handbook_of_hydraulic_calculations
- [3] А. Н. Хазратов, А. Р. Раҳимов, and Ф. Ф. Бобомуродов, “Моделирования смешанных течений земляных каналов,” in *Актуальные проблемы науки и образования в условиях современных вызовов*, 2022, pp. 160–167. Accessed: Nov. 21, 2024. [Online]. Available: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49913566>
- [4] S. Eshev and F. Bobomurodov, “EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE PHYSICAL PROPERTIES OF BOUND SOILS ON THE WASHING PROCESS,” *UniversumTechnical Sci.*, vol. 102, no. 9–5, Sep. 2022, doi: 10.32743/UniTech.2022.102.9.14293.
- [5] S. S. Eshev, M. Avlakulov, and F. F. Bobomurodov, “Assessment of the effect of the physical properties of bonded grunts on the process of self-washing,” *Innov. Technol.*, vol. 3, p. 47, 2022.
- [6] E. Sobir, G. Israil, R. Ashraf, B. Furqat, and A. Dilovar, “Calculation of parameters of subsurface ridges in a steady flow of groundwater channels,” *E3S Web Conf.*, vol. 410, p. 05022, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202341005022.
- [7] S. Eshev, N. Mamatov, F. Bobomurodov, R. Usmonov, and U. Makhmudov, “SHO ‘RLANGAN BOG ‘LANGAN GRUNT NAMLIGINING YUVILISHGA QARSHILIK QILISH TA ‘SIRINI BAHOLASH,” *Innov. Texnologiyalar*, vol. 51, no. 03, pp. 70–76, 2023.
- [8] A. N. Khazratov, O. S. Bazarov, A. R. Jumayev, F. F. Bobomurodov, and N. Z. Mamatov, “Influence of cohesion strength in cohesive soils on channel bed erosion,” in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, 2023, p. 05018. Accessed: Nov. 21, 2024. [Online]. Available: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2023/47/e3sconf_form2023_05018/e3sconf_form2023_05018.html
- [9] F. F. O. Bobomurodov, “BOG ‘LANGAN GRUNTLI KANAL KESIMI BO ‘YICHA TEZLIK LARNING TAQSIMLANISHI,” *Orient. Renaiss. Innov. Educ. Nat. Soc. Sci.*, vol. 4, no. 1, Art. no. 1, 2024.
- [10] I. Gaimnazarov, M. Rakhmatov, U. Otakulov, A. Jumayev, and A. Khazratov, “KANALLARNING NOSTATSIONAR OQIM SHAROITLARIDA

OQIZIQLAR SARFINI ANIQLASH BO‘YICHA DALA TADQIQOTLARI,”
Innov. Texnologiyalar, vol. 52, no. 3, 2023, Accessed: Nov. 21, 2024. [Online].
Available: <https://ojs.qmii.uz/index.php/it/article/view/596/388>

- [11] А. Н. Исақов, И. К. Холмаматов, У. Т. Юлдошева, Н. Ж. Раимова, А. Р. Ҳазратов, and Ж. Н. Исақов, “ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСВЯЗНЫХ И СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ, СЛАГАЮЩИХ НИЖНИЙ БЪЕФ.,” *Interpret. Res.*, 2024, Accessed: Nov. 21, 2024. [Online]. Available: <http://interpretationandresearches.uz/index.php/iar/article/view/2546>