

каналов полигонального профиля с двумя и тремя парами симметричных откосов и шириной внизу $b \geq 0$. Новая методика с разными моделями расчета позволяет использовать современные системы электронного проектирования каналов, тем самым обеспечить более точный выбор их оптимальных гидравлических характеристик.

1. **Агроскин И. И.** Гидравлический расчет каналов. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1958. – 80 с.

2. **Косиченко Ю. М.** Каналы переброски стока России. – Новочеркасск: НГМА, 2004. – 470 с.

3. **Курбанов С. О., Ханов Н. В.** К гидравлическому расчету наивыгоднейших сечений энергетических каналов полигонального профиля // Гидротехническое строительство. – 2003. – № 7. – С. 40–43.

4. **Угинчус А. А.** Гидравлические и технико-экономические расчеты каналов – М.: Стройиздат, 1965. – 274 с.

5. **Курбанов С. О., Ханов Н. В.** Основы оптимизации полигональных сечений гидротехнических каналов // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 12. – С.

6. Гидротехнический канал: А. с. № 1640271 МКИ Е 02 В 5/00 / С. О. Курбанов, Н. В. Ханов (СССР). – № 4625064/15; заявл. 26.12.1988; опубл. 07.04.91, Бюл. № 13. – 3 с.

7. Гидротехнический канал: патент № 2189420 Российская Федерация, МПК Е 02 В 5/00. / С. О. Курбанов, К. С. Курбанов; заявитель и патентообладатель Кабардино-Балкарская государственная сельскохозяйственная академия. – № 2000114269/13; заявл. 05.06.2000; опубл. 20.05.03, Бюл. № 14. – 5 с.

Материал поступил в редакцию 23.09.11.

Курбанов Салигаджа Омерович, кандидат технических наук, доцент
E-mail: 05bcreg@rambler.ru

Румянцев Игорь Семенович, доктор технических наук, профессор
Тел. 8(499)976-24-60

УДК 502/504:627.132:532.543

М. А. МИХАЛЕВ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

А. К. АЛИБЕКОВ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Дагестанский государственный технический университет», Махачкала

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ТИПА ОПОРЫ И ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ МЕСТНОГО РАЗМЫВА

Предлагаются расчетные зависимости для определения глубины и плановых параметров воронки размыва русла у опор на свайных фундаментах. Область определения многофакторной функции исследована методами математического планирования эксперимента при соблюдении требований теории подобия и размерностей.

Местный размыв, защита от размыва, свайные опоры, многофакторный эксперимент.

There are proposed calculated dependencies for determination of the depth and planned parameters of the erosion pool at the pile work footing. The definition domain of the multi-factor function is investigated by methods of mathematical planning of the experiment under observation of the requirements of the similarity and dimensionality theory

Local erosion, erosion protection, piles footing, multi-factor experiment.

Надежность функционирования сооружений, пересекающих водотоки на опорах, в значительной степени определяется достоверным прогнозом величины местного размыва русла у опор. Их защита от подмыва – актуальная задача.

Целью настоящей работы является выбор оптимального типа опоры и определение размеров воронки местного размыва русла, сложенного однородными несвязными грунтами.

Прогноз местного размыва русла у опор базируется на экспериментальных исследованиях. Это продиктовано сложностью процесса взаимодействия сильно турбулизированного потока с конструкциями опор нередко сложной геометрической формы при подвижной нижней границе – размываемом, как правило, несвязном грунте основания.

Для выбора оптимальной (с точки зрения наименьшей величины местного размыва русла) конструкции опоры проведены экспериментальные исследования в гидравлическом лотке шириной 0,61 м, длиной 10,8 м и высотой 0,9 м. Дно лотка формировалось из однородных несвязных грунтов со средним диаметром d частиц: 0,21; 0,47; 0,69; 1,49 мм. Основным критерием, учитывающим деформируемость русла, выбрано условие кинематического подобия [1]: $u/u_0 = idem$, где u – средняя скорость потока, набегающего на опору; u_0 – неразмывающая (допускаемая) скорость потока. Геометрическое подобие выражено симплексами, характеризующими геометрию опоры и потока. Модель опоры устанавливалась на расстоянии 6,3 м от головного устройства.

Результаты опытов с опорами, представленными на рис. 1, наиболее полно приведены в [2]. Отметим основные выводы: глубина h_p и плановые размеры воронки размыва a_x и a_y являются наименьшими для опор на свайных фундаментах при высоком расположении плиты ростверка относительно дна потока. В опытах, когда верх плиты ростверка и обрез массивного фундамента располагались на уровне дна потока, параметры воронки размыва были наименьшими для опор с массивным фундаментом и на сваях. Этот факт объясняется тем, что обрез фундамента или плита ростверка играют защитную роль – частично гасят нисходящие воронкообразующие струи потока.

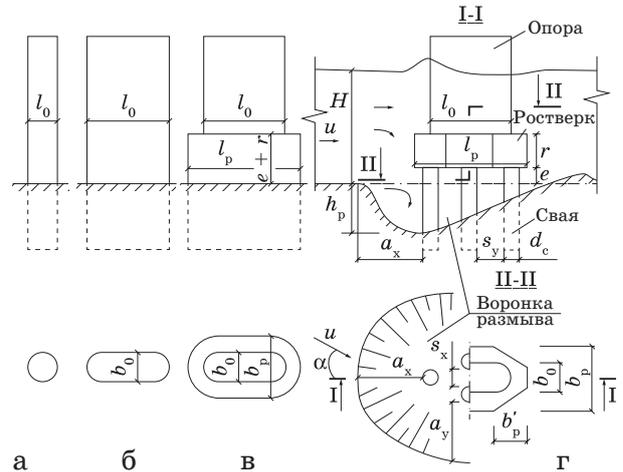


Рис. 1. Типы опор и параметры опор, потока и воронки размыва: а – круглая опора; б – овальная опора; в – опора с массивным фундаментом; г – опора на свайном фундаменте

По результатам значительной части опытов и по мнению практически всех исследователей, одним из главных факторов, определяющих максимальные параметры воронки размыва, является ширина препятствия потоку [3–5]. Опора на свайном фундаменте отличается от других типов опор наличием сквозности, что уменьшает эту ширину. Куст свай, преломляя струйки, способствует повышению турбулентности и гашению определенной части энергии потока, и лишь остальная часть энергии идет на деформацию размываемого дна. Плита ростверка частично гасит нисходящие токи. Поэтому опоры на свайных фундаментах считаются оптимальными. Они предпочтительны с точки зрения производства работ и сроков возведения.

Параметры воронки размыва у опор на сваях зависят от следующих факторов: $h_p, a_x, a_y = f(H, d, u, u_{*0}, \nu, \rho, g, \rho_1, l_0, b_0, \Phi_0, l_p, b_p, r, \Phi_p, e, f_c, d_c, s_x, s_y, \Phi_c, n_x, n_y, \alpha)$, (1) где H – глубина потока; u_{*0} – динамическая скорость потока, отвечающая началу трогания частиц грунта; ν – коэффициент кинематической вязкости воды; ρ – плотность воды; g – ускорение силы тяжести; ρ_1 – плотность грунта, слагающего русло; l_0, b_0, Φ_0 – параметры опоры – соответственно длина, ширина и плановая форма; l_p, b_p, r, Φ_p – параметры плиты ростверка – соответственно длина, ширина, толщина и плановая форма; e – высота положения ростверка относительно дна потока; $f_c, d_c, s_x, s_y, n_x, n_y, \Phi_c$ – параметры, характеризующие куст свай – соответственно плановую форму размещения свай в пла-

не, диаметр, расстояния в свету и число свай вдоль и поперек, плановую форму отдельной сваи; α – угол набегания потока на опору.

Для упрощения задачи использована методика, заключающаяся в поиске связей между определяющими исследуемое явление параметрами [1]. Так, анализ конструкций большого числа опор реальных мостовых переходов показал, что число свай n_x, n_y однозначно определяется факторами $l_p, b_p, \Phi_p, d_c, s_x, s_y$ (их учитывать дополнительно в (1) не нужно). Качественный фактор Φ_p учтен с помощью количественного фактора b'_p (см. рис. 1г): при $b'_p = 0$ форма плиты ростверка прямоугольная, а при $b'_p > 0$ – обтекаемая. Плановая форма ростверка определяет плановую схему расположения свай, в связи с чем фактор Φ_c также исключен из рассмотрения. Плановая форма отдельной сваи не учитывалась из-за ее постоянства в опытах (большинство опор возводят на сваях круглой формы). Окончательное уравнение, положенное в основу экспериментальных исследований в случае опоры на свайном фундаменте, получено в следующем виде:

$$\frac{h_p}{d_c}, \frac{a_x}{d_c}, \frac{a_y}{d_c} = \Phi \left(\begin{array}{l} \frac{u}{u_0}, \frac{b_0}{H}, \frac{l_0}{b_0}, \frac{e}{H}, \frac{s_x}{b_0}, \\ \frac{s_y}{b_0}, \frac{r}{b_0}, \frac{d_c}{b_0}, \frac{b_p - b_0}{s_y + d_c}, \\ \frac{l_p - l_0}{s_x + d_c}, \frac{b'_p}{b_0}, \Phi_0, \alpha \end{array} \right). \quad (2)$$

Трудным этапом исследований был охват многомерной области изменения факторов: если каждый из 13 безразмерных параметров в правой части (2) варьировать хотя бы на трех уровнях, то при полнофакторном эксперименте необходимо провести $N = 3^{13} = 1\,594\,323$ опытов. Существующие исследования также являются весьма ограниченными как по числу, так и по условиям проведения опыта [5]. Порядок их проведения поясним с помощью трехмерного факторного пространства, представленного на рис. 2, поскольку 13-мерное пространство не наглядно.

Пусть искомая функция зависит от трех параметров: x_1, x_2 и x_3 . Опыты проводятся по принципу: сначала изменяется фактор x_1 с определенным шагом при постоянных x_2 и x_3 , далее при постоянных x_1 и x_3 меняют x_2 и на последнем этапе

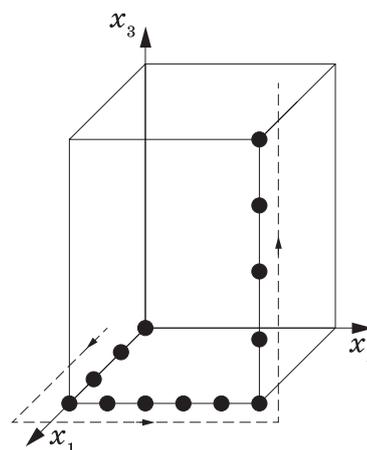


Рис. 2. Трехмерное пространство

меняется x_3 при постоянных x_1 и x_2 . Но, как видно из рис. 2, значительная часть области изменения факторов осталась необследованной, хотя каждый фактор изменялся в своем диапазоне и на нескольких уровнях.

В [3] проведены аналогичные исследования с применением принципа независимого влияния отдельных элементов опоры на величину размыва. У других авторов многомерная функция представлена в виде произведения нескольких функций: условно одну принимают за базовую, остальные – с коэффициентами. Такие подходы вполне допустимы, но с одним условием: должна быть исследована вся область, т. е. реализовано N опытов.

Расчетные формулы, полученные частичным охватом факторного пространства, могут привести к непредсказуемым результатам. Например, в конце 80-х годов прошлого века Ленинградским филиалом ГипродорНИИ проектировался мост через Кольский залив около города Мурманска. При сдаче этого моста в эксплуатацию в 2005 году центральные средства массовой информации подчеркнули две уникальные особенности: 1) это первый мост в нашей стране за полярным кругом, 2) глубина забивки свай составила 40 м. Представим: при глубине воды 6...10 м и скорости потока 2...3 м/с сваи ниже дна залива забиваются на глубину 13-этажного дома! Глубина 40 м определялась величиной общего размыва (до 2 м), несущей способностью и глубиной местного размыва. А последняя величина была рассчитана по методике (см. рис. 2). Специальная серия опытов, проведенная в лаборатории русловых процессов ЛПИ

имени М. И. Калинина, с опорами этого моста позволила оценить глубину местного размыва не более 9...11 м.

Один из способов решения сложных многофакторных задач – применение методов теории планирования эксперимента, когда практически приемлемым числом опытных точек охватывается вся область определения искомой функции. В [6] предлагается свыше 10 тыс. различных планов (способов «разбрасывания» опытных точек по исследуемой области). К сожалению, многие экспериментаторы из разных регионов нашей страны считают применение методов планирования эксперимента известным и пройденным этапом. Однако не отвечают на вопрос выбора одного «лучшего» плана для решения конкретной задачи, не говоря о других «мелочах» вроде значений уровней варьирования фактора внутри диапазона его изменения и др. Ответы на эти и другие актуальные вопросы даны, в частности, в [7].

На основе определения числа факторов, априорного установления вида будущей модели явления местного размыва, желаемого или возможного количества опытов, выбора интервалов и числа уровней варьирования каждого фактора, критериев оптимальности плана, наличия в модели качественного фактора, учета требований к факторам был однозначно выбран факторный план эксперимента в 32 опытах [6].

Для изучения явления местного размыва проведена предварительная серия из 70 опытов и две основные серии по 32 опыта для случая отсутствия и поступления наносов в воронку размыва (с двукратным повтором). При выборе критериев оптимальности плана эксперимента основное внимание было обращено на получение искомых зависимостей, дающих меньшие расхождения при сравнении с результатами независимых опытов или с натурными данными (Q - и G -критерии оптимальности). Интервалы варьирования факторов выявлены путем анализа размеров типовых и реальных проектов мостовых переходов, разработанных Ленгипротранс и Ленгипротрансмост. Всего изготовлено 74 модели опор, из них 7 – для проведения независимых опытов. Число рядов свай n_x изменялось от 1 до 4, а в продольном направлении n_y – от 2 до 9. Куст свай в плане образовывал пря-

моугольную и обтекаемую формы в соответствии с формой ростверка. При выборе числа уровней варьирования фактора учитывались его значимость, вид функциональной связи с параметрами воронки, ширина интервала. Значения уровней варьирования факторов приняты на концах интервалов и в точках, которые являются корнями производных соответствующих полиномов Лежандра. Фактор Φ_0 , характеризующий плановое очертание лобовой части опоры, отнесен к категории качественных с тремя уровнями варьирования: 0 – лобовая часть опоры, заостренная с углом при вершине 90° , 1 – полукруглая, 2 – прямоугольная. С помощью факторов Φ_0 и l_0/b_0 охвачены пять типов опор: круглая, овальная, квадратная, прямоугольная, заостренная. Исследования проведены для следующих интервалов и числа уровней варьирования безразмерных комплексов из (2):

а) 2 уровня: $\frac{b_p - b_0}{s_y + d_c} = 0,8...1,6$; $\frac{l_p - l_0}{s_x + d_c} = 0,6...1,4$;

$\frac{r}{b_0} = 0,5...1,0$; $\frac{b'_p}{b_0} = 0...0,5$; $\frac{s_x}{b_0} = 0,15...0,6$;

б) 3 уровня: $\frac{e}{H} = -0,1...0,6$; $\frac{d_c}{b_0} = 0,3...0,69$;

$\frac{b_0}{H} = 0,2(2)...0,55$;

в) 4 уровня: $\frac{l_0}{b_0} = 1...4$; $\frac{s_y}{b_0} = 0...0,8$; $\alpha = 0...35^\circ$;

$\frac{u}{u_0} = 0,55...0,95$ и $\frac{u}{u_0} = 1...1,8$.

Обработка результатов опытов для прогноза максимальных параметров воронки местного размыва позволяет рекомендовать следующие зависимости, справедливые для вышеуказанных диапазонов изменения факторов:

при $u/u_0 \geq 1,0$: $h_p/d_c = (z_1 \pm \Delta z_1)^2$; $a_x/d_c = (z_2 \pm \Delta z_2)^2$; $a_y/d_c = (z_3 \pm \Delta z_3)^2$, (3)

при $u/u_0 < 1,0$: $h_p/d_c = (z_4 \pm \Delta z_4)^2$; $a_x/d_c = (z_5 \pm \Delta z_5)^2$; $a_y/d_c = (z_6 \pm \Delta z_6)^2$, (4)

где $\Delta z_j (j = 1, 2, \dots, 6)$ – половины ширины доверительного интервала, оцененные со степенью достоверности 0,95 ($\Delta z_1 = 0,228$; $\Delta z_2 = 0,231$; $\Delta z_3 = 0,240$; $\Delta z_4 = 0,174$; $\Delta z_5 = 0,211$; $\Delta z_6 = 0,248$); $z_j = 10^{-3} \sum_{i=1}^{22} b_{j,i} x_i$ ($b_{j,i}$ – коэффициенты регрессии, $i = 1, 2, \dots, 22$; x_i – функции от факторов) (таблица).

Достоверность предлагаемых зависимостей проверена с помощью независимых лабораторных опытов и натурных данных по опорам моста в городе Саратове через Волгу и мостового перехода через реку Бразос у Ричмонда (США) [3, 4].

Функции от факторов	b_{1i}	b_{2i}	b_{3i}	b_{4i}	b_{5i}	b_{6i}
1	2	3	4	5	6	7
$x_1 = 1,0$	750,9	403,0	2461,0	2173,1	2464,9	21200
$x_2 = \ln(1 + r/b_0)$	406,7	689,1	0	0	0	0
$x_3 = \ln(1 + (b_p - b_0)/(s_y - d_c))$	204,2	392,0	436,5	315,3	326,71	0
$x_4 = \ln(1 + (l_p - l_0)/(s_x - d_c))$	205,7	0	458,9	203,9	0	270,3
$x_5 = \ln(1 + s_x/b_0)$	-228,7	-310,5	0	0	0	0
$x_6 = \ln(1 + b_0/H)$	-114,0	0	2922,2	2106,5	2642,7	1998,8
$x_7 = \ln(H/(H + e))$	556,0	762,9	769,0	429,5	718,0	434,6
$x_8 = \ln(d_c/b_0)$	-597,6	-551,9	-863,7	453,5	-694,8	-909,2
$x_9 = \ln(1 + \alpha^\circ\pi/180^\circ)$	567,6	1650,5	1117,0	1110,7	0	2580,4
$x_{10} = \ln(1 + s_y/b_0)$	3665,0	3901,2	1141,6	652,9	0	0
$x_{11} = \ln(l_0/b_0)$	210,1	3596,6	218,9	611,6	570,4	719,2
$x_{12} = \ln(u/u_0)$	-1311,8	0	-2102,7	-404,7	-6532,6	-5479,0
$x_{13} = \ln(1 + b'_p/b_0)$	0	0	0	0	-461,21	-453,6
$x_{14} = x_{14}^2$	0	0	1390,3	1002,2	1257,3	951,0
$x_{15} = x_9^2$	0	-6923,6	0	-4659,0	0	-10824
$x_{16} = x_{10}^2$	-12038	-13886	-1942,1	-1110,7	0	0
$x_{17} = x_{11}^2$	0	-5188,8	0	-882,3	-882,9	-1038,0
$x_{18} = x_{12}^2$	6282,4	0	9774,8	-9012,3	-27833	-25878
$x_{19} = x_9^3$	0	9681,3	0	6514,7	0	15136
$x_{20} = x_{10}^3$	10670,9	13062	0	0	0	0
$x_{21} = x_{11}^3$	0	2495,3	0	424,3	395,7	499,0
$x_{22} = x_{12}^3$	-7125,5	0	-11086	-9255,7	-24620	-23200

Достоверность зависимостей обусловлена также и полным охватом факторного пространства. Учитывая вероятностный характер изменения части факторов и неизбежность известных типов ошибок, зависимости даны с доверительными интервалами. Вероятность того, что параметры воронки размыва окажутся в интервале $[(z_j - \Delta z_j)^2 d_c; (z_j + \Delta z_j)^2 d_c]$, равна 95 %. На стадии проектирования Δz_j в (3) и (4) нужно взять со знаком «плюс», т. е. глубину и плановые параметры воронки размыва у опоры принять с возможным запасом.

1. Михалев М. А. Общие принципы моделирования гидравлических явлений в деформируемом русле // Известия ВНИИГ имени Б. Е. Веденеева. – 1983. – Т. 168. – С. 47–51.
2. Алибеков А. К. Оптимальный тип опоры сооружений, пересекающих водотоки / Сб. науч. тр. гидротехнического факультета. – Махачкала: ДГТУ, 2008. – С. 46–52.
3. Журавлев М. М. Местный размыв у опор мостов. – М.: Транспорт, 1984. – 113 с.
4. Николаев Е. И. Местный размыв у столбчатых опор мостов с учетом угла набегания потока на опоры (косое течение): дис. ... канд.

техн. наук. – Саратов, 1982. – 225 с.

5. Пустова Л. А. Исследование влияния формы опор на свайных ростверках на местный размыв/ Совершенствование конструкции железобетонных пролетных строений автомобильных мостов и технологии их строительства: Труды СоюздорНИИ – М.: СоюздорНИИ, 1982. – С. 82–92.

6. Таблицы планов эксперимента: для факторных и полиномиальных моделей / Под ред. В. В. Налимова. – М.: Металлургия, 1982. – 752 с.

7. Алибеков Н. А., Алибеков А. К. Актуальные вопросы постановки экспериментальных исследований // Вестник Дагестанского государственного технического университета. – 2010. – № 17(II) Технические науки. – С. 85–91.

Материал поступил 23.03.11.

*Алибеков Али Казимбекович, кандидат технических наук, доцент
Тел. 8 (10872) 62-89-93
E-mail: ali.dgtu@rambler.ru*
*Михалев Михаил Алексеевич, доктор технических наук, профессор
Тел. 8-911-288-17-00
E-mail: mikhalev@cef.spbstu.ru*