

**Для цитирования:** Алибеков А.К. Оценка размыва у свайных опор сооружений, пересекающих водотоки, с учетом показателей надежности и неоднородности грунтов основания. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (1): 181-192. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-1-181-192  
**For citation:** Alibekov A.K. Evaluation of scouring at pile-supported structures crossing watercourses according to reliability and inhomogeneity indicators of grounding foundations. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (1): 181-192. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-1-181-192

## ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК: 627.132:532.543

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-1-181-192

### ОЦЕНКА РАЗМЫВА У СВАЙНЫХ ОПОР СООРУЖЕНИЙ, ПРЕСЕКАЮЩИХ ВОДОТОКИ, С УЧЕТОМ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ И НЕОДНОРОДНОСТИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ

**Алибеков А.К.**

Дагестанский государственный технический университет,  
367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия,  
e-mail: ali.dgtu@rambler.ru

**Резюме. Цель.** Задача состояла в получении моделей для прогноза параметров воронки местного размыва водным потоком русла у опор на свайных фундаментах с учетом надежности и неоднородности грунта основания. **Метод.** В работе использованы методы математического планирования эксперимента, теории подобия и размерностей; произведена корректная обработка результатов опытов. **Результат.** Установлены определяющие исследуемое явление факторы, подробно анализированы и обобщены существующие подходы и способы проведенных исследований. Для возможности постановки опытов в лабораторных условиях и переноса результатов в натурные условия с помощью методов теории подобия и размерностей получено критериальное уравнение, описывающее явление местного размыва. Размерность многомерной задачи снижена за счет учета явных связей между безразмерными факторами. Деформируемость грунтов основания учтена с помощью кинематического подобия потоков. Из большого количества планов эксперимента обоснованно выбран факторный план эксперимента. Таким способом полностью охвачено факторное пространство при условии обеспечения более точного прогноза параметров воронки размыва. Интервалы и число уровней варьирования факторов определены путем анализа размеров типовых и реальных проектов опор с учетом рекомендаций и требований, предъявляемых к свайным опорам при их проектировании, учтены размеры гидравлического лотка для проведения опытов. В результате обработки результатов опытов получены искомые зависимости для случаев отсутствия и поступления наносов в воронку размыва. Проверка адекватности полученных моделей произведена на основе независимых лабораторных опытов и натурных данных по рекам Бразос и Волга. Неоднородность грунтов ложа русла учитывается с помощью диаметра частиц отмостки. Для повышения надежности прогноза местного размыва рекомендуется в полученных зависимостях учитывать установленные верхние границы доверительных интервалов искомых функций. **Вывод.** Предложена методика определения глубины и плановых параметров воронки размыва русла, сложенного несвязными грунтами, у свайных опор сооружений, пересекающих водотоки, с заданной степенью достоверности.

**Ключевые слова:** водотоки, местный размыв, свайные опоры, однородные и неоднородные грунты, надежность

TECHNICAL SCIENCE  
BUILDING AND ARCHITECTURE

EVALUATION OF SCOURING AT PILE-SUPPORTED STRUCTURES CROSSING  
WATERCOURSES ACCORDING TO RELIABILITY AND INHOMOGENEITY  
INDICATORS OF GROUNDING FOUNDATIONS

*Ali K. Alibekov*

*Daghestan State Technical University,  
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala, 367026, Russia,  
e-mail: ali.dgtu@rambler.ru*

**Abstract Objectives.** *The aim was to obtain models for predicting local scouring funnel parameters caused by the water flow at the bed by pile foundation supports taking into account the reliability and heterogeneity of the foundation ground. **Methods.** Mathematical experiment planning methods informed by the theory of similarity and dimensions were used in the work; appropriate processing of the experimental results was carried out. **Results.** Factors determining the investigated phenomenon were determined. Existing approaches and methods used in already conducted studies were analysed in detail and summarised. For the possibility of setting up the experiments under laboratory conditions and transferring results to field conditions using the methods of the theory of similarity and dimensions, a criterion equation describing the phenomenon of local scouring was obtained. The dimensionality of the multidimensional problem is reduced by taking into account the explicit relationships between the dimensionless factors. The deformability of the foundation grounds is accounted for by the kinematic similarity of the flows. The factorial design of the experiment was justified on the basis of a large number of experimental plans. In this way, the factor space is completely covered, providing a more accurate prediction of the scouring funnel parameters. The intervals and the number of levels of factor variation are determined by analysing the sizes of typical and realistic support designs, taking into account the recommendations and requirements for designing piling pillars; the dimensions of the hydraulic tray for conducting the experiments were also taken into account. As a result of the processing of experimental data, the required dependencies were obtained for both the absence and input of deposits into the scouring funnel. The adequacy of the obtained models was checked on the basis of independent laboratory experiments and full-scale data on the Brazos and Volga rivers. The heterogeneity of the channel bed grounds is accounted for by the diameter of the pavement particles. To improve the reliability of the local scouring forecast, it is recommended that the obtained dependencies take into account the upper limits of the confidence intervals of the required functions. **Conclusion.** A technique is proposed for determining the depth and planned parameters of a channel scouring funnel, composed of disjointed grounds near pile-supported structures crossing watercourses with a specified degree of reliability.*

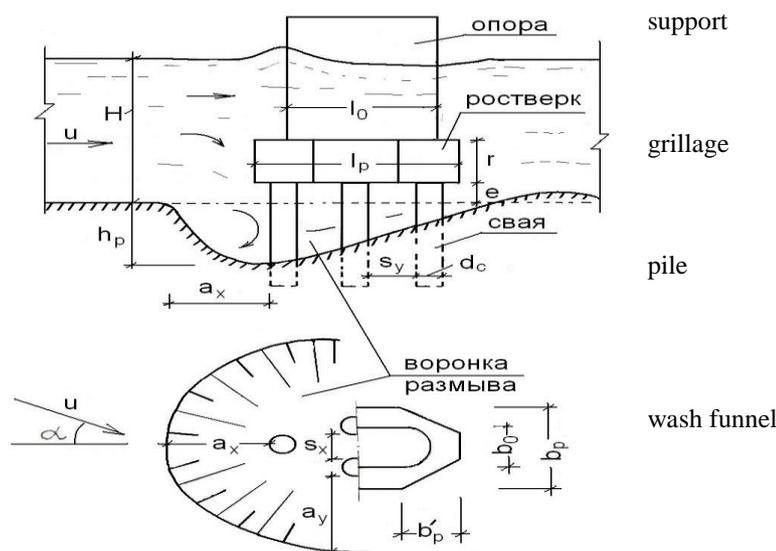
**Keywords:** *watercourses, local scouring, pile supports, homogeneous and heterogeneous grounds, reliability*

**Введение.** Надежность работы сооружений, пересекающих различные водотоки, в преобладающей степени зависит от глубины заложения их фундаментов, которая зависит, в частности, и от достоверного прогноза величины местного размыва русла.

Так, глубина воронки местного размыва у опор моста через р.Волга из г.Саратов в г.Энгельс достигла 7 м [8]. Дальнейший подмыв опор был остановлен путем отсыпки камня в воронку размыва. На сегодня прогноз местного размыва базируется на экспериментальных исследованиях [2, 13, 16-18, 20 и др.], хотя в [14] сделана попытка прогноза местного размыва у опор моста через р.Танана на Аляске на основе 3D-моделирования.

**Постановка задачи.** Задача заключалась в получении моделей для прогноза параметров воронки местного размыва водным потоком русла у опор на свайных фундаментах с учетом надежности и неоднородности грунта основания.

**Методы исследования. Объект исследования представлен на рис.1.**



**Рис. 1. Схема опоры на свайном фундаменте**  
**Fig. 1. Scheme of support on a pile foundation**

Отсутствие аналитического решения поставленной задачи объясняется сложной геометрической формой опоры на сваях и подвижным деформируемым руслом. Кинематика потока в процессе взаимодействия потока с опорой становится сильно турбулентной, зависящей в том числе от количества свай, конфигурации и просвета между ними.

Согласно [5, 8, 10-11, 15 и др.] параметры воронки размыва зависят от множества факторов (рис.1): глубины потока  $H$ , средней скорости потока  $u$ , средневзвешенного диаметра частиц, как правило, несвязного однородного грунта  $d$ , неразмывающей скорости потока  $u_0$ , ширины  $b_0$ , длины  $l_0$  и плановой формы  $\Phi_0$  опоры, высоты положения верха плиты ростверка или обреза фундамента массивной опоры относительно уровня общего размыва русла  $e + r$ , угла набегания потока на опору  $\alpha$ , длины, ширины, толщины и плановой форма плиты ростверка  $l_p$ ,  $b_p$ ,  $r$ ,  $\Phi_p$ , параметров, характеризующих куст свай (соответственно плановая форма отдельной сваи  $f_c$ , диаметр  $d_c$ , расстояния в свету между сваями  $s_x$  и  $s_y$ , форма расположения куста свай в плане  $\Phi_c$ , количество рядов свай вдоль и поперек продольной оси опоры  $n_y$  и  $n_x$ ), вязкости  $\nu$  и плотности воды  $\rho$  и др. Итого более 20 факторов.

Функциональная зависимость максимального параметра воронки  $y$  (глубины  $h_p$  или плановых размеров  $a_x$  и  $a_y$ )

$$y = f(H, u, d, u_0, b_0, l_0, \Phi_0, e, \alpha, l_p, b_p, r, \Phi_p, d_c, s_x, s_y, \Phi_c, n_y, n_x \text{ и др.}). \quad (1)$$

Если варьировать 20 факторов на минимально возможных двух уровнях, то при полном факторном эксперименте получается более миллиона опытов:  $N = 2^{20} = 1048576$ .

При учете 7 факторов на трех уровнях варьирования  $N = 3^7 = 2187$  опытов.

Имеем ситуацию: 1) такое число опытов практически нереализуемо, имея в виду еще изготовление большого числа моделей опор и продолжительность одного опыта 10-12 часов, 2) без полного охвата области изменения факторов построенные на опытных данных модели будут неадекватными даже в принятом диапазоне изменения факторов.

Остановимся на отмеченном подробно: в [16] проведено всего 26 опытов, в [17] – 67, в [18] – 46, в [20] – 105, в [10, 19 и др.] приведены зависимости, полученные на основе совсем малого числа опытов. Можно отметить и количество факторов: в [15] указано 10, в [16] отмечены 13, а в опытах варьировались 5, в [18] – 11, в [19] – 5. Аналогичная картина в [9, 13 и др.].

К чему могут привести расчеты по формулам, полученным на основе малого числа опытов и без учета части факторов, покажем на примере [2]. Глубина заложения свайных опор первого в нашей стране моста за полярным кругом через Кольский залив около г. Мурманск, сдан-

ного в эксплуатацию в 2005 году, принята 40 м. Это при глубине потока до 10 м и при скоростях до 3 м/с.

Такая сомнительно большая глубина заложения определялась и глубиной местного размыва, рассчитанная по методике, полученной на неполном исследовании многофакторного пространства (1). Специальная серия опытов с опорами этого моста показала возможность достижения глубины местного размыва от 9 до 11 м (с запасом). Если учесть, что в одну такую опору входило 32 сваи, а опор большое количество, то можно представить объем возможной экономии средств и времени строительства объекта. Подобные практические примеры однозначно показывают также и актуальность поставленной задачи.

Для преодоления указанных выше трудностей часть исследователей сложную опору на сваях расчленили на составляющие элементы и их исследовали по отдельности [3, 10, 13, 17 и др.]. Это означает представление многомерной функции (1) в виде произведения нескольких функций. При этом одна условно принимается за базовую функцию, остальные типа коэффициентами:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_l, \dots, x_m, \dots, x_n) = f_0(x_1, x_2, x_3)k_1k_2k_3, \quad (2)$$

где  $x_1, \dots, x_n$  – факторы,

$f_0(x_1, x_2, x_3)$  – базовая функция (зависимость для определения параметра воронки размыва у одиночной круглой цилиндрической опоры),

$k_1 = f_1(x_4, \dots, x_l)$ ,  $k_2 = f_2(x_{l+1}, \dots, x_m)$ ,  $k_3 = f_3(x_{m+1}, \dots, x_n)$  – коэффициенты (формы опоры, «косины» и т.п.).

Далее при экспериментальном поиске формулы, например, для коэффициента  $k_2$ , варьировались только  $x_{l+1}, \dots, x_m$  при постоянных значениях остальных факторов. Это позволяет вроде уменьшить число опытов. Однако при этом ничего не говорится о том, сохранятся ли полученные закономерности при новых значениях прежних постоянных факторов. Как и следовало ожидать, специально поставленная серия опытов не подтвердила возможность такого допущения.

Наиболее подробный анализ работ отечественных и зарубежных исследователей позволяет отметить:

- не всегда указаны пределы применения предлагаемых зависимостей и не обоснованы пределы изменения определяющих явление факторов,
- при проведении модельных лабораторных исследований не учтены требования теории подобия и размерностей,
- для случая многомерного явления на основе однофакторного эксперимента проведено слишком мало опытов, в результате не охвачена область определения искомой функции,
- не обосновано допущение исключения взаимного влияния элементов опоры сложной конструкции,
- предлагаемые зависимости не проверены с помощью независимых опытов или натуральных данных.

Для решения поставленной задачи и с целью хотя бы частичного уменьшения размерности задачи предварительно были использованы явные связи между определяющими исследуемое явление параметрами [5-7].

Так, анализ конструкций большого числа опор показал, что число свай  $n_x$  и  $n_y$ , однозначно определяются факторами  $l_p, b_p, \Phi_p, dc, s_x, s_y$  и тогда учитывать дополнительно  $n_x, n_y$  не имеет смысла. Качественной фактор  $\Phi_p$  был учтен с помощью количественного фактора  $b'_p$ : при  $b'_p > 0$  имеем обтекаемую форму плиты ростверка (рис. 1), при  $b'_p = 0$  прямоугольную. Плановая форма ростверка в свою очередь определяет конфигурацию расположения свай в плане и поэтому фактор  $\Phi_c$  можно исключить из рассмотрения. Плановую форму отдельной сваи  $f_c$  также можно опустить, учитывая постоянство этого фактора в опытах (большинство опор возводят на сваях круглой плановой формы).

При моделировании явления на гидравлических моделях в качестве основного критерия, учитывающего деформируемость русла, выбрано условие кинематического подобия [7]:

$$\frac{u}{u_0} = idem.$$

Выражая геометрическое подобие симплексами, характеризующими геометрию опоры и потока, с помощью методов теории подобия и размерностей получено критериальное уравнение, положенное в основу экспериментальных исследований:

$$\frac{h_p}{d_c}, \frac{a_x}{d_c}, \frac{a_y}{d_c} = f \left( \frac{u}{u_0}, \frac{b_0}{H}, \frac{l_0}{b_0}, \frac{e}{H}, \frac{s_x}{b_0}, \frac{s_y}{b_0}, \frac{r}{b_0}, \frac{d_c}{b_0}, \frac{b_p - b_0}{s_y + d_c}, \frac{l_p - l_0}{s_x + d_c}, \frac{b'_p}{b_0}, \Phi_0, \alpha \right) \quad (3)$$

Одним из способов решения многофакторных сложных задач представляется применение методов теории математического планирования эксперимента, когда практически приемлемым числом опытных точек охватывается вся область определения искомой функции [1]. А конкретные точки обследования факторного пространства определяются принятым планом эксперимента, то есть здесь требуется обосновать принятие одного плана из более чем 10 тыс., приведенных в каталоге планов [12].

Обобщение известных положений теории планирования эксперимента и ее непосредственное практическое применение показало, что для однозначного и корректного выбора плана эксперимента в случае поиска модели явления необходимо и достаточно предварительно ответить на следующие вопросы [1]: определение числа факторов; установление вида будущей модели явления; выбор интервалов и числа уровней варьирования каждого фактора; выбор критериев оптимальности плана; определение желаемого или возможного количества опытов (минимальное количество опытов соответствует критерию насыщенности). Сюда же следует отнести предварительную проверку выполнимости требований активного эксперимента к отдельному фактору и к совокупности факторов.

Предлагаемая модель явления местного размыва и число уровней варьирования факторов первоначально установлены на основе априорной информации по местному размыву у различных типов опор, а затем уточнены с помощью предварительной серии опытов. Однозначно было установлено, что для случаев отсутствия и наличия поступления наносов в воронку размыва нужно строить отдельные модели. При выборе числа уровней варьирования отдельного фактора учитывались: ширина интервала варьирования, его значимость и вид функциональной связи (линейный или нелинейный) с параметрами воронки размыва.

Интервалы варьирования факторов, характеризующих геометрию опоры на свайных фундаментах, выявлены путем анализа размеров типовых и реальных проектов опор, разработанных Ленгипротранс и Ленгипротрансмост. Учтены также рекомендации и требования, предъявляемые к опорам таких конструкций при их проектировании, и размеры гидравлического лотка, где необходимо было провести экспериментальные исследования [6, 11].

Для исследования параметров воронки размыва приняты следующие интервалы и число уровней варьирования безразмерных комплексов, частично измененных по форме представления с целью удобства получения корректного вида модели:

- два уровня:

$$\frac{b_p - b_0}{s_y + d_c} = 0,8 \dots 1,6; \quad \frac{l_p - l_0}{s_x + d_c} = 0,6 \dots 1,4; \quad \frac{r}{b_0} = 0,5 \dots 1,0; \quad \frac{b'_p}{b_0} = 0 \dots 0,5; \quad \frac{s_x}{b_0} = 0,15 \dots 0,6;$$

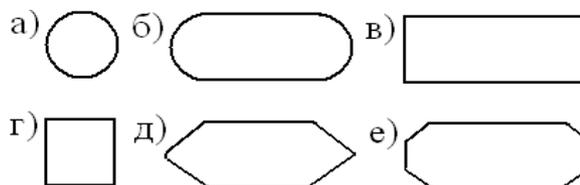
- три уровня:

$$\frac{e}{H} = -0,1 \dots 0,6; \quad \frac{d_c}{b_0} = 0,3 \dots 0,69; \quad \frac{b_0}{H} = 0,2(2) \dots 0,55;$$

- четыре уровня:

$$\frac{l_0}{b_0} = 1,0 \dots 4,0; \quad \frac{s_y}{b_0} = 0 \dots 0,8; \quad \alpha = 0 \dots 35^\circ; \quad \frac{u}{u_0} = 0,55 \dots 0,95; \quad \text{и} \quad \frac{u}{u_0} = 1,0 \dots 1,8.$$

Фактор  $\Phi_0$ , характеризующий плановое очертание лобовой части опоры, был отнесен к категории качественных с тремя уровнями варьирования (цифрами - словесно): 0 – лобовая часть опоры заостренная с углом при вершине  $90^\circ$  (рисунок 2, д), 1 – полукруглая (рис. 2, а, б), 2 – прямоугольная (рис. 2, в, г).



**Рис. 2. Плановые формы элементов опоры:**  
 а) круглая б) овальная, в) прямоугольная, г) квадратная,  
 д) заостренная, е) заостренная с притуплением  
**Fig. 2. Planned forms of support elements: a) round b) oval, c) rectangular, d) square,**  
**e) pointed, e) pointed with blunting**

Таким способом с помощью факторов  $\Phi_0$  и  $l_0/b_0$  охвачены пять типов опор: круглая, овальная, квадратная, прямоугольная, заостренная. Значения уровней крупности частиц грунта  $d = 0,21; 0,47; 0,69$  и  $1,49$  мм.

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, не учтенными при построении этих зависимостей ( $Q$ - и  $G$ -критерии оптимальности). Учитывая трудоемкость изготовления большого числа моделей опор на свайных фундаментах, к плану эксперимента было предъявлено также требование насыщенности.

Проверка на адекватность зависимостей для определения параметров воронки размыва по результатам предварительной серии опытов показала, что в качестве факторов в искомые зависимости нужно ввести логарифмы натуральных критериев (некоторые в несколько видоизмененном виде) из уравнения (3). Кроме того, удовлетворение требований к отдельному фактору и к совокупности факторов (однозначность, совместимость, независимость и др.) определило форму представления безразмерных комплексов, а также их варьирование в опытах путем изменения как числителя, так и знаменателя.

По результатам априорной информации и предварительной серии опытов для проведения модельных исследований выбран факторный план эксперимента в 32 опытах [12], который позволяет получить зависимость вида:

$$y = \theta_0 + \zeta(\Phi_0) + \sum_{i=1}^a \theta_i x_i + \sum_{j=1}^b \theta_{jj} x_j^2 + \sum_{k=1}^c \theta_{kkk} x_k^3, \quad (4)$$

где  $y$  – отклик (в конечном итоге относительный параметр воронки размыва  $h_p/d_c$ , или  $a_x/d_c$ , или  $a_y/d_c$ ),

$\zeta(\Phi_0)$  – функция, учитывающая влияние на отклик качественного фактора  $\Phi_0$ ,

$x$  – количественные факторы (поддающиеся измерению),

$a$  – общее число количественных факторов из (3),  $a = 12$ ,

$b$  – число количественных факторов с числом уровней варьирования больше двух,  $b = 7$ ,

$c$  – число количественных факторов с 4-мя уровнями варьирования,  $c = 4$ ,

$\theta$  – параметры, определяемые по результатам опытов.

Для принятого факторного плана эксперимента значения уровней варьирования факторов приняты на концах интервалов и в точках, которые являются корнями производных соот-

ветствующих полиномов Лежандра.

При изготовлении моделей опор за основу были приняты широко применяемые на практике конструкции. Всего было изготовлено 74 модели, из них 7 – для проведения независимых опытов, предназначенных лишь для проверки приемлемости искомых зависимостей.

Число рядов свай-оболочек в лобовой части опоры  $n_x$  изменялось от 1 до 4, а в продольном направлении  $n_y$  – от 2 до 9 (на практике встречаются случаи, когда  $n_y$  значительно больше 9, однако на величину местного размыва дальнейшее увеличение рядов свай  $n_y$  не влияет). Куст свай в плане образовывал прямоугольную и обтекаемую формы в соответствии с формой ростверка. Состав и условия проведения опытов полностью определялись принятым планом эксперимента. Проведены две серии экспериментов для случаев поступления наносов в воронку размыва ( $u/u_0 \geq 1,0$ ) и отсутствия поступления наносов ( $u/u_0 < 1,0$ ).

Каждая основная серия включала по 32 опыта с двукратным повтором каждого. Для получения зависимостей проведено 128 опытов без учета независимых опытов и более 70 опытов предварительной серии.

Экспериментальные исследования проведены в гидравлическом лотке шириной 0,61 м и длиной 10,8 м. Основная серия из 64 опытов проведена с привлечением методов математического планирования эксперимента [12]. При этом основное внимание было обращено, в частности, на получение расчетных зависимостей, позволяющих определять параметр воронки местного размыва  $y$  с большей точностью.

Известно, что истинный параметр воронки размыва

$$y = \hat{y} \pm \Delta y, \quad (5)$$

где  $\hat{y}$  – расчетное значение параметра размыва,

$\Delta y$  – половина ширины доверительного интервала.

Условие (5) означает, что параметр размыва по формуле  $\hat{y}$  при сравнении с действительной величиной  $y$ , наблюдаемой в опытах или в натуре, оценивается по результатам опытов с определенной (заданной) доверительной вероятностью  $p$  [1].

Отсюда вытекает: чем меньше величина  $\Delta y$  (при необходимой доверительной вероятности  $p$ ), тем точнее (более надежно) можно прогнозировать параметры воронки местного размыва.

Количественными оценками показателя надежности служат [1, 12]:

- 1) ширина доверительного интервала – точность показателя надежности;
- 2) доверительная вероятность – достоверность показателя надежности.

Дополнительно следует иметь в виду и тот факт, что при различных значениях определяющих факторов расхождения параметров воронки размыва, найденных по расчетным формулам, при сравнении с натурными данными или с лабораторными независимыми данными, скорее всего, получатся разными.

В этой связи помимо уменьшения величины  $\Delta y$  желательно дополнительно выдвигать условие постоянства  $\Delta y$  в области изменения факторов. На этой основе при выборе конкретного плана эксперимента из более 10 тыс. различных планов был избран факторный план эксперимента, удовлетворяющий Q- и G- критериям оптимальности [12].

**Обсуждение результатов.** В результате обработки результатов опытов на ЭВМ для определения параметров воронки местного размыва русла, сложенного из однородных несвязных грунтов, получены следующие расчетные зависимости [5]:

при  $u/u_0 \geq 1,0$ :

$$h_p/d_c = k_1(z_1 \pm \Delta z_1)^2, \quad a_x/d_c = k_1(z_2 \pm \Delta z_2)^2, \quad a_y/d_c = k_1(z_3 \pm \Delta z_3)^2, \quad (6)$$

при  $u/u_0 < 1,0$ :

$$h_p/d_c = k_1(z_4 \pm \Delta z_4)^2, \quad a_x/d_c = k_1(z_5 \pm \Delta z_5)^2, \quad a_y/d_c = k_1(z_6 \pm \Delta z_6)^2, \quad (7)$$

где  $\Delta z_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 6$ ) – доверительные интервалы, соответствующие доверительной вероятности  $p = 0,95$  (табл. 1);

**Таблица 1. Доверительные интервалы параметров воронки размыва**  
**Table 1. Confidence intervals for the parameters of the wash funnel**

Относительный параметр воронки размыва	случай	
	$u/u_0 \geq 1,0$ :	$u/u_0 < 1,0$ :
$h_p/d_c$	$\Delta z_1 = 0,228$	$\Delta z_4 = 0,174$
$a_x/d_c$	$\Delta z_2 = 0,231$	$\Delta z_5 = 0,211$
$a_y/d_c$	$\Delta z_3 = 0,240$	$\Delta z_6 = 0,248$

$k_t$  – коэффициент, учитывающий развитие параметров воронки размыва во времени  $t$  (час):

$$k_t = \begin{cases} 0, & \text{при } t = 0, \\ 0,17 + 0,23t - 0,0153t^2, & \text{при } 0 < t \leq 9 \text{ часов,} \\ 1,0, & \text{при } t > 9 \text{ часов,} \end{cases} \quad (8)$$

$$z_j = 10^{-3} \sum_{i=1}^{22} b_{ji} x_i; \quad i = 1, 2, \dots, 22,$$

$b_{ji}$  – коэффициенты регрессии (табл. 2),

$x_i$  – фиктивный фактор (функция от фактического фактора, табл. 2).

**Таблица 2. Факторы и коэффициенты регрессии**  
**Table 2. Factors and coefficients of regression**

Факторы Factors	Коэффициенты регрессии Coefficients of regression					
	$b_{1i}$	$b_{2i}$	$b_{3i}$	$b_{4i}$	$b_{5i}$	$b_{6i}$
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
$x_3 = \ln\left(1 + \frac{b_p - b_0}{s_y + d_c}\right)$	204,2	392,0	436,5	315,3	326,71	0
$x_4 = \ln\left(1 + \frac{l_p - l_0}{s_x + d_c}\right)$	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
$x_7 = \ln\left(\frac{H}{H + e}\right)$	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
$x_{11} = \ln(1 + l_0/b_0)$	210,1	3596,6	218,9	611,6	570,4	719,2

продолжение таблицы 2 Continuation of Table 2						
1	2	3	4	5	6	7
$x_{13} = \ln(1 + b'_p/b_0)$	0	0	0	0	-461,21	-453,6
$x_{14} = x_6^2$	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	-5189	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	15136,0
$x_{20} = x_{10}^3$	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	-11086,5	-9255,7	-24619,7	-23198,0

Подобно интерпретации пределов доверительного интервала, рекомендации для практического применения предлагаемых зависимостей в случае однородных грунтов основания (6) и (7) заключаются в следующем. Если нужно определить относительные параметры воронки размыва при определенных значениях факторов, то вероятность того, что этот параметр будет находиться в интервале  $[(z_j - \Delta z_j)^2; (z_j + \Delta z_j)^2]$  равна 95%.

Отсюда вытекает:

1) на стадии проектирования в (6) и (7)  $\Delta z_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 6$ ) нужно взять со знаком «плюс», то есть принимать величину параметра воронки размыва с возможным запасом;

2) если в расчетных зависимостях принять  $\Delta z_j = 0$ , то получим результат, имеющий привычный смысл: «расчетное значение по формуле» -  $(h_p/d_c)_{\text{расч}}$ .

3) при  $k_t = 1,0$  имеем стабилизировавшуюся во времени воронку размыва.

Практически представляется интересным сопоставление значений глубины размыва с учетом и без учета доверительного интервала (при  $k_t = 1,0$ ):

$$k_1 = \frac{h_p/d_c}{(h_p/d_c)_{\text{расч}}} = \frac{(z_1 \pm z_1)^2}{z_1^2} = 1 \pm \frac{2\Delta z_1}{z_1} + \frac{\Delta z_1^2}{z_1^2} \quad (9)$$

По результатам проведенных опытов  $k_1 = \pm (1,02 \dots 1,28)$ . Из (9) видно, что с увеличением  $z_1$  (относительной глубины размыва  $h_p/d_c$ ) увеличивается точность предсказания (точность показателя надежности):  $k_1 \rightarrow 1,0$ .

Для проверки полученных зависимостей были проведены независимые (неучтенные при получении формул (6) и (7)) опыты и привлечены натурными данные по рекам Бразос (США) и Волга [3, 8]. Результаты сравнения представлены на рис.3, откуда видна большая точность по зависимостям (6) и (7) без учета доверительных интервалов.

Отметим также, при построении расчетных зависимостей в [3] и [10] натурные данные были включены, что должно было автоматически обеспечить большую точность. Кроме того, с целью большей надежности зависимости (6) и (7) предлагаются с доверительными интервалами. По имеющимся 58 данным, представленным на рис. 3, лишь одна точка не попала в доверительный интервал, что соответствует погрешности 1,7% (предлагаемые доверительные интервалы допускают 5%-й погрешности). Таким образом, рис. 3 подтверждает приемлемость предлагаемой методики, полученной с использованием современных методов исследования.

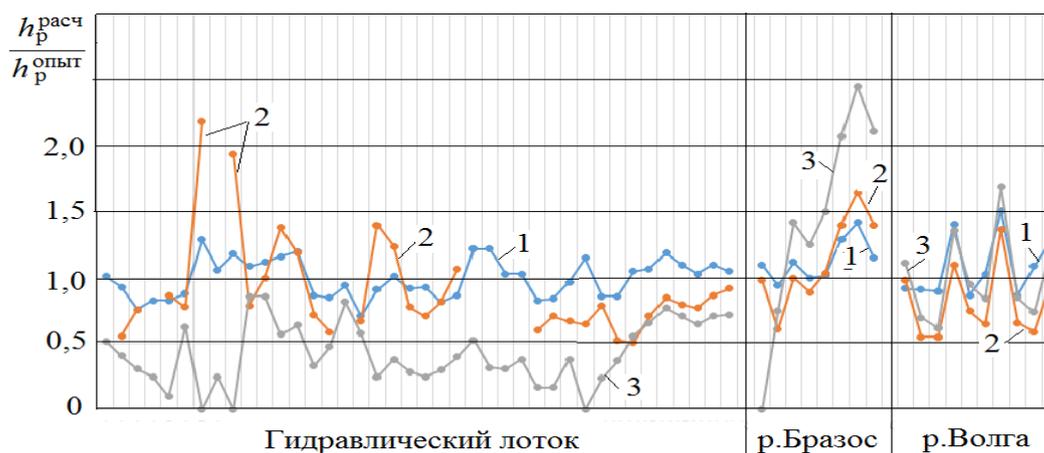


Рис. 3. Сравнение с независимыми лабораторными и натурными данными: 1 – автор, 2 – [3], 3 – [10] Fig. 3. Comparison with independent laboratory and field data: 1 - author, 2 - [3], 3 - [10]

В случае неоднородных несвязных грунтах в процессе размыва происходит изменение гранулометрического состава поверхностного слоя грунта, в результате чего образуется естественная отмостка из более крупных частиц и параметры воронки местного размыва оказываются меньшими. По результатам опытов в составе окончательно сформированного поверхностного слоя наряду с крупными частицами встречаются и мелкие, что объясняется механической и гидродинамической защитой мелких частиц крупными частицами [4].

В зависимости от начальных гидравлических условий минимальный диаметр частиц отмостки может колебаться в зависимости от величины средневзвешенного  $d_{cp}$  до максимального диаметра частиц исходной смеси. Окончательный состав отмостки зависит от толщины переработанного потоком грунта, с другой стороны, глубина размыва регулируется степенью укрупнения состава грунта. Средний диаметр частиц отмостки [4]

$$D_{отм} = d_{cp} + \frac{h(1 - k_0)(1 - P_{d_{cp}})}{1 + h(0,95 - P_{d_{cp}}) / d_{95}}, \quad (10)$$

где  $h$  – толщина размываемого слоя,

$k_0 = d_{cp} / d_{95}$  – коэффициент однородности грунта,

$d_{95}$  – диаметр частиц, меньше которых в составе грунта содержится 95% (по весу),

$P_{d_{cp}}$  – ордината интегральной гранулометрической кривой, соответствующая средневзвешенному диаметру частиц  $d_{cp}$ .

**Вывод.** Расчет параметров воронки местного размыва русла, сложенного из неоднородных несвязных грунтов, предлагается вести методом подбора в следующей последовательности:

а) исходя из  $d_{cp}$  находят неразмывающую скорость потока по одной из известных методик  $u_0$ , а затем по (6) и (7) определяются  $h_p$ ,  $a_x$ ,  $a_y$ ;

б) принимая  $h = 0,33h_p$  по (10) находят  $D_{отм}$ ;

в) считая грунт однородным со средним диаметром частиц  $d = D_{отм}$ , надо находить новые значения  $u_0$ ,  $h_p$ ,  $a_x$  и  $a_y$ ;

г) пункты б) и в) повторяем до тех, пока значения параметров воронки местного размыва на данном шаге не будут совпадать их значениями на предыдущем шаге с необходимой (заданной) точностью.

Рассмотрим некоторые результаты расчетов по определению параметров воронки местного размыва в случаях однородных и неоднородных несвязных грунтов русла. Исходными данными являются:  $d_{cp} = 0,00047$  м;  $\nu = 0,000001$  м<sup>2</sup>/с – коэффициент кинематической вязкости;  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup> – плотность воды;  $\rho_{гр} = 2650$  кг/м<sup>3</sup> – плотность грунта (приведенные параметры

необходимы для определения неразмывающей скорости потока  $u_0$  по [7]);  $P_{d_{cp}}=0,59$ ;  $d_{95}=0,00124$  м;  $H=7,6$  м;  $u=0,9$  м/с;  $r=2$  м – толщина плиты ростверка;  $d_c=1,5$  м – диаметр свай;  $S_x=1,2$  м – расстояние в свету между сваями в лобовой части опоры;  $S_y=1,5$  м – расстояние в свету между сваями в продольном направлении;  $e=1,3$  м;  $\alpha=20^0$ ;  $b_p=1$  м – величина среза углов плиты ростверка;  $l_0=7,5$  м – длина опоры;  $l_p=10,5$  м – длина плиты ростверка.

Глубина воронки для однородных грунтов в действительности может находиться в интервале от  $h_p^{\min}=5,99$  м ( $\Delta z_1 - 0,228$ ) до  $h_p^{\max}=9,03$  м ( $\Delta z_1 + 0,228$ ). Расчетное значение глубины воронки  $h_p=7,43$  м ( $\Delta z_1=0$ ). Коэффициент надежности  $k_H=h_p^{\max}/h_p=9,03/7,43=1,22$ . На стадии проектирования рекомендуется принять  $h_p^{\max}=9,03$  м, соответствующая доверительной вероятности (или достоверность показателя надежности)  $p=0,95$ .

В случае неоднородных грунтов при  $k_0=0,379$  глубина воронки размыва меньше (при одинаковых значениях остальных факторов) по сравнению с однородными несвязными грунтами и соответственно составляют:  $h_p^{\min}=4,86$  м;  $h_p=5,85$  м;  $h_p^{\max}=6,92$  м, то есть учет явления образования отмоксти снижает отметку заложения фундамента опоры на 2,11 м, что существенно может влиять на стоимость сооружения, поскольку одна опора может включать до 30 свай, а всего опор может быть несколько в зависимости от ширины преодолеваемой водной преграды. Кроме учета неоднородности грунта и показателя надежности, существенное отличие предлагаемой методики от результатов исследований других авторов заключается в том, что она получена путем исследования всей области изменения определяющих факторов, что удалось осуществить путем использования методов математического планирования эксперимента. Применение методов теории подобия и размерностей облегчило распространение результатов модельных лабораторных результатов на натурные условия.

#### Библиографический список:

1. Алибеков А.К., Алибеков Г.А. Основы теории планирования эксперимента и практика ее применения. - Махачкала: ФГБОУ ВО «ДГТУ», 2017. – 175 с.
2. Алибеков А.К., Идрисова С.Г. Местный размыв русла у мостовых опор: Сб. науч. тр. междунар. науч.-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития дорожно-транспортного комплекса, (5-6 апреля 2017) - Махачкала: Махачкалинский филиал МАДИ, -2017. – С.91-94.
3. Журавлев М.М. Местный размыв у опор мостов. - М.: Транспорт, 1984. - 113 с.
4. Магомедова А.В. Эрозионные процессы в руслах рек и каналов. – М.: Изд-во ВЗПИ, 1990. - 203 с.
5. Михалев М.А., Алибеков А.К. Выбор оптимального типа опоры и оценка величины местного размыва//Природообустройство, №5, 2011. –С.46-50
6. Михалев М.А. О моделировании местного размыва русла за водосбросными плотинами //Инженерно-строительный журнал, №2, 2013, - С. 67-74.
7. Михалев М.А. Физическое моделирование гидравлических явлений. - СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. - 443 с.
8. 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.
9. Пуркин, В.И. Проектирование мостовых переходов: учебное пособие / В.И. Пуркин, А.С. Холин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МАДИ, 2014. – 60 с.
10. СП 32-102-95 Сооружения мостовых переходов и подтопляемых насыпей. Методы расчета местных размывов. – М.: Корпорация «Транстрой», 1996. -79 с.
11. СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03- 85 / Мин-во регионального развития Российской Федерации. – М., 2011. – 74 с.
12. Таблицы планов эксперимента: Для факторных и полиномиальных моделей/ Под ред. Налимова В.В. – М.: Металлургия, 1982. –752 с.
13. Amini A., Melville B.W, Ali T.M. Local scour at piled bridge piers including an examination of the superposition method //Canadian Journal of Civil Engineering, 41 (5), 2014, pp. 461-471
14. Esmaeili T., Dehghani A. A., Zahiri A. R., Suzuki K. 3D Numerical Simulation of Scouring Around Bridge Piers (Case Study: Bridge 524 crosses the Tanana River) //World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering Vol:3, No:10, 2009. pp. 422-426.
15. Evaluating Scour at Bridges // Hydraulic Engineering Circular No. 18, Fifth Edition, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, 2012. – 318 p.
16. Hesham F., Ibrahim H. E., Reducing local scour at bridge piers using an upstream subsidiary triangular pillar. Arab J Geosci (2016) 9: 598. pp.1-8.
17. Moreno M., Birjukova O., Grimaldi C., Gaudio R., Cardoso A. Experimental study on local scouring at pile-supported piers// Acta Geophysica, June 2017, Volume 65, Issue 3, pp. 411–421.
18. Mostafa Y. E., Agamy A.F.//International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST), Vol. 3 No. 11, 2011. pp. 8160-8178.
19. Mubeen B., Salman B., Scour Reduction around Bridge Piers: A Review. International Journal of Engineering Inventions, 2013, Volume 2, Issue 7, pp. 07-15.
20. Wang H., Tang H.W., Xiao J.F., Wang Y., Jiang Sh. Clear-water local scouring around three piers in a tandem arrangement//Science China Technological Sciences June 2016, Volume 59, Issue 6, pp. 888–896.

### References:

1. Alibekov A.K., Alibekov G.A. Osnovy teorii planirovaniya eksperimenta i praktika ee primeneniya. Makhachkala: FGBOU VO "DGTU"; 2017. 175 s. [Alibekov A.K., Alibekov G.A. Fundamentals of the theory of experiment planning and practice of its application. Makhachkala: FGBOU VD "DGTU"; 2017. 175 p. (In Russ.)]
2. Alibekov A.K., Idrisova S.G. Mestnyi razmyv rusla u mostovykh opor. Sb.nauch.tr.mezhdunar.nauch.-prakticheskoi konferentsii "Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya dorozhno-transportnogo kompleksa". Makhachkala: Makhachkalinskiy filial MADI; 2017. S.91-94. [Alibekov A.K., Idrisova S.G. Local scour of the bed at the bridge supports. Proceedings of the International scientific-practical conference "Relevant problems and prospects for the development of the road and transport complex". Makhachkala; 2017. P.91-94. (In Russ.)]
3. Zhuravlev M.M. Mestnyi razmyv u opor mostov. M.: Transport; 1984. 113 s. [Zhuravlev M.M. Local scour at the bridge supports. M.: Transport; 1984. 113 p. (In Russ.)]
4. Magomedova A.V. Erozionnye protsessy v ruslakh rek i kanalov. M.: Izd-vo VZPI; 1990. 203 s. [Magomedova A.V. Erosion processes in the channels of rivers and canals. M.: Izd-vo VZPI; 1990. 203 p. (In Russ.)]
5. Mikhalev M.A., Alibekov A.K. Vybór optimal'nogo tipa opory i otsenka velichiny mestnogo razmyva. Prirodoobustroistvo. 2011;5:46-50. [Mikhalev M.A., Alibekov A.K. Choosing the optimal type of support and estimating the magnitude of local scour. Prirodoobustroistvo. 2011;5:46-50. (In Russ.)]
6. Mikhalev M.A. O modelirovanii mestnogo razmyva rusla za vodosbrosnymi plotinami. Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal. 2013;2:67-74. [Mikhalev M.A. On the modeling of local scour of the channel behind spillway dams. Magazine of Civil Engineering. 2013;2:67-74. (In Russ.)]
7. Mikhalev M.A. Fizicheskoe modelirovanie gidravlicheskiykh yavleniy. SPb: Izd-vo Politekhnikeskogo un-ta; 2010. 443 s. [Mikhalev M.A. Physical modeling of hydraulic phenomena. SPb: Izd-vo Politekhnikeskogo un-ta; 2010. 443 p. (In Russ.)]
8. Nikolaev E.I. Mestnyi razmyv u stolbchatykh opor mostov s uchetom ugla nabeganiya potoka na opory (kosoe techenie): Dis. kand. tekhn. nauk. Saratov; 1982. 225 s. [Nikolaev E.I. Local scour at the pillar supports of bridges taking into account the angle of flow on the supports (oblique flow). Candidate of Technical Sciences Thesis; 1982. 225 p. (In Russ.)]
9. Purkin V.I., Kholin A.S. Proektirovanie mostovykh perekhodov: uchebnoe posobie. 2-e izd. M.: MADI; 2014. 60 s. [Purkin V.I., Kholin A.S. Designing of bridge passages: a tutorial. 2nd ed. M.: MADI; 2014. 60 p. (In Russ.)]
10. SP 32-102-95 Soorzheniya mostovykh perekhodov i podtoplyaemykh nasypei. Metody rascheta mestnykh razmyvov. M.: Korporatsiya "Transtroi"; 1996. 79 s. [SP 32-102-95 Constructions of bridge crossings and submerged embankments. Methods for calculating local scour. M.: Korporatsiya "Transtroi"; 1996. 79 p. (In Russ.)]
11. SP 24.13330.2011 Svainye fundamenty. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.03- 85. Min-vo regional'nogo razvitiya Rossiiskoi Federatsii. M.; 2011. 74 s. [SP 24.13330.2011 Pile foundations. Updated version of SNiP 2.02.03- 85. Ministry of Regional Development of the Russian Federation. M.; 2011. 74 p. (In Russ.)]
12. Tablitsy planov eksperimenta: Dlya faktornykh i polinomial'nykh modelei. Pod red. V.V Nalimova. M.: Metallurgiya; 1982. 752 s. [Tables of experiment plans: For factorial and polynomial models. V.V. Nalimov (Ed.). M.: Metallurgiya; 1982. 752 p. (in Russ.)]
13. Amini A., Melville B.W., Ali T.M. Local scour at piled bridge piers including an examination of the superposition method. Canadian Journal of Civil Engineering 2014;41(5):461-471.
14. Esmaeili T., Dehghani A.A., Zahiri A.R., Suzuki K. 3D Numerical Simulation of Scouring Around Bridge Piers (Case Study: Bridge 524 crosses the Tanana River). World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering. 2009;3(10):422-426.
15. Evaluating Scour at Bridges. Hydraulic Engineering Circular No. 18, Fifth Edition, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration; 2012. 318 p.
16. Hesham F., Ibrahim H. E. Reducing local scour at bridge piers using an upstream subsidiary triangular pillar. Arab J Geosci. 2016;9(598):1-8.
17. Moreno M., Birjukova O., Grimaldi C., Gaudio R., Cardoso A. Experimental study on local scouring at pile-supported piers. Acta Geophysica. 2017;65(3):411-421.
18. Mostafa Y.E., Agamy A.F. International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). 2011;3(11):8160-8178.
19. Mubeen B., Salman B. Scour Reduction around Bridge Piers: A Review. International Journal of Engineering Inventions. 2013;2(7):07-15.
20. Wang H., Tang H.W., Xiao J.F., Wang Y., Jiang Sh. Clear-water local scouring around three piers in a tandem arrangement. Science China Technological Sciences. 2016;59(6):888-896.

### Сведения об авторе:

**Алибеков Али Казибекевич** – кандидат технических наук, доцент, кафедра бурения нефтяных и газовых скважин.

### Information about the author.

**Ali K. Alibekov** – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of drilling oil and gas wells..

### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.12.2017.

Принята в печать 24.01.2018.

### Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 02.12.2017.

Accepted for publication 24.01.2018.