МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ВСЕСОЮЗНЫЙ ДОРОЖНЫЙ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
СОЮЗДОРНИИ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО РАСЧЕТУ МЕСТНОГО РАЗМЫВА У ОПОР МОСТОВ

(2-е ИЗД., ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ)

Утверждены зам.директора Союздорнии
канд.техн.наук Б.С.Марышевым

Одобрены Главным техническим управлением
(письмо № 37-7-15 от 26.06.80г.)

МОСКВА 1988

УДК 624.21

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ МЕСТНОГО РАЗМЫВА У ОПОР МОСТОВ. 2-е изд., перераб. и доп. Союздорнии. М., 1988.

При разработке Методических рекомендаций учтены недостатки как отечественных, так и зарубежных методов расчета местного размыва у опор мостов.

Приводится новый теоретико-экспериментальный метод расчета местного размыва в условиях несвязных и связных грунтов. В отличие от существующих эмпирических методов расчета по неразмывающим скоростям, характеризующим первую подвижку наносов, предлагаемый метод основан на взмучивающих скоростях, которые в зоне резко турбулентного потока у опоры соответствуют переносу наносов во взвешенном и полувзвешенном состояниях.

Для получения общего выражения взмучивающих скоростей и построения расчетного метода использованы данные многочисленных натурных замеров местных размывов у опор мостов, обработка которых велась одновременно статистическим и аналитическим методами.

В результате получены расчетные формулы для определения глубины местного размыва для разных режимов наносов. Рассмотрены примеры расчетов.

По сравнению с первым изданием (1981 г.) настоящие Методические рекомендации дополнены методами расчета местного размыва у опор с переменными по высоте сечениями, расчета размыва у опор на высоких свайных ростверках и у затопляемых преград.

Табл.6, рис.11, библ.7.

© Государственный всесоюзный дорожный научно-исследовательский институт, 1988.

УДК 624.21

Предисловие

"Методические рекомендации по расчету местного размыва у опор мостов"[x] являются результатом исследований, проведенных Союздорнии в последние годы. Эти исследования показали, что существующие отечественные и зарубежные эмпирические формулы для расчета местного размыва, основанные, главным образом, на данных лабораторных экспериментов, дают результаты, значительно отличающиеся от натурных данных, а в некоторых случаях искажают фактический смысл явления размыва.

В Союздорнии на основе натурных данных получена принципиально новая характеристика устойчивости наносов в зоне резко турбулентного потока перед опорой - взмучивающая скорость, характеризующая вихревой перенос наносов во взвешенном и полувзвешенном состояниях.

Рекомендуемый расчетный метод получен в результате анализа взаимодействия жидкой (лобовое давление потока на опору) и твердой (параметр турбулентного переноса наносов) фаз потока. Окончательные выражения параметров теоретико-экспериментальной зависимости определены двумя независимыми путями - статистическим и аналитическим. Оба подхода показали полную идентичность расчетных выражений.

Отзывы на первое издание "Методических рекомендаций по расчету местного размыва у опор мостов" (Союздорнии. М., 1981) свидетельствуют о заинтересованности проектных институтов Минтрансстроя, Госстроя СССР, Минкомхоза и Минавтодора РСФСР, мин-

---

x) Основные буквенные обозначения см. стр. 39.

дорстроев союзных республик в практическом применении предложенного метода.

Десятилетний опыт применения метода Союздорнии в проектных институтах разных ведомств и сравнение выполненных по нему расчетов с данными натурных измерений у опор существующих мостов дали вполне удовлетворительные результаты и показали, что точность метода укладывается в точность исходных данных. Кроме того, метод Союздорнии был сопоставлен параллельно с натурными данными и с расчетами по другим, как отечественным, так и зарубежным, методам, в том числе с методами, появившимися в последние 7-10 лет. Это сопоставление также показало лучшую сходимость результатов расчета по методу Союздорнии с натурными данными по сравнению с другими методами.

По сравнению с первым настоящее издание дополнено рядом разработок, необходимость которых выдвинута практикой. К ним относятся расчеты местных размывов у опор мостов с переменными по высоте сечениями, у опор на высоких свайных ростверках и у затопляемых преград.

Следует напомнить, что в первом издании Методических рекомендаций расчет местного размыва производился по средней ширине опоры $b_{ср}$. Для развитых в нижней части опор это несколько (на 5-10%) снижало расчетную глубину размыва, поэтому в формулу глубины местного размыва был введен постоянный коэффициент 1,1. При переходе на непосредственный учет ширин элементов в опорах с переменными по высоте сечениями надобность в этом коэффициенте отпала. Однако ввиду того, что в практике мостового строительства сравнительно часто встречаются опоры лишь с небольшим уширением нижней их части, расчет глубины размыва по $b_{ср}$ сохранен и в настоящем документе, но ограничен случаем, когда нижняя (уширенная) часть

опоры возвышается над дном не более чем на 1/3 глубины потока, а соотношение ширин элементов примерно одинаковой формы для двухступенчатой опоры ориентировочно составляет: $b_1/b_2 \leqslant 1,2$. Размыв у трехступенчатой опоры рассчитывается, как правило, по формулам для переменного сечения.

Для автоматизации расчетов размывов у опор предложенным методом Белгипродором составлена программа MEROP (автор В.С.Ищенко). Программа написана на языке Фортран-1У для ЭВМ СМ-4, ЕС-1022 и др. Она предусматривает расчет размыва у опор как простой, так и сложной формы при числе элементов опоры до четырех (не считая свайного основания). Одновременно можно производить расчет размыва у большого количества опор (до 20).

В качестве исходных данных в программе приняты: эпюра элементарных расходов в подмостовом русле, углы косины потока у опор, коэффициент возрастания расхода в отверстии моста, геометрические характеристики элементов опор, характеристики грунтов послойно (до восьми слоев). В результате расчета выдаются на печать: скорости набегания потока на опоры, донная и средняя взмучивающие скорости, отметки дна воронок размыва.

Для индивидуальных расчетов Тбилгипроавтодортрансом составлены удобные бланки расчета местного размыва у опор (автор А.А.Александров).

При составлении настоящих Методических рекомендаций, помимо работ Союздорнии, были использованы работы О.В.Андреева, И.А.Ярославцева, В.С.Кнороза, Г.С.Пичугова и некоторые положения "Технических указаний по расчету местного размыва у опор мостов, струенаправляющих дамб и траверсов" ВСН 62-69 (Минтрансстрой. М., 1970).

Следует отметить, что некоторые вопросы прогноза местного размыва еще недостаточно изучены, поэтому

в настоящих Методических рекомендациях они либо не освещены (размыв у регуляционных дамб и траверсов), либо приведены с некоторыми допущениями (формулы, определяющие коэффициент косины потока K_α, размыв в связных грунтах, коэффициент $K_п$, учитывающий снижение размыва при наличии лобовой полки на уступе опоры или обрезе ее фундамента).

Для создания строгой физической теории местного размыва у опор необходимо расширение кадастра натурных данных /2/. Союздорнии будет благодарен проектным, строительным и дорожно-мостовым эксплуатационным организациям за предоставление данных замеров глубин местных размывов у строящихся и существующих опор мостов. При этом, кроме глубин размыва, необходимых параметров потока и грунтов /2/, следует указать дату и способ замеров, а также приложить схему опоры.

Методические рекомендации составлены канд. техн. наук М.М.Журавлевым.

Замечания и пожелания просьба направлять по адресу: 143900, Московская обл., г.Балашиха-6, ш.Энтузиастов, 79, Союздорнии.

I. Общие положения

1.1. Настоящие Методические рекомендации предназначены для применения при проектировании мостовых переходов под автомобильные и железные дороги.

1.2. Глубину местного размыва у опор (рис.1) определяют после расчета глубины общего размыва подмостового русла. Самую низкую отметку дна у опоры устанавливают суммированием глубины общего и местного размыва.

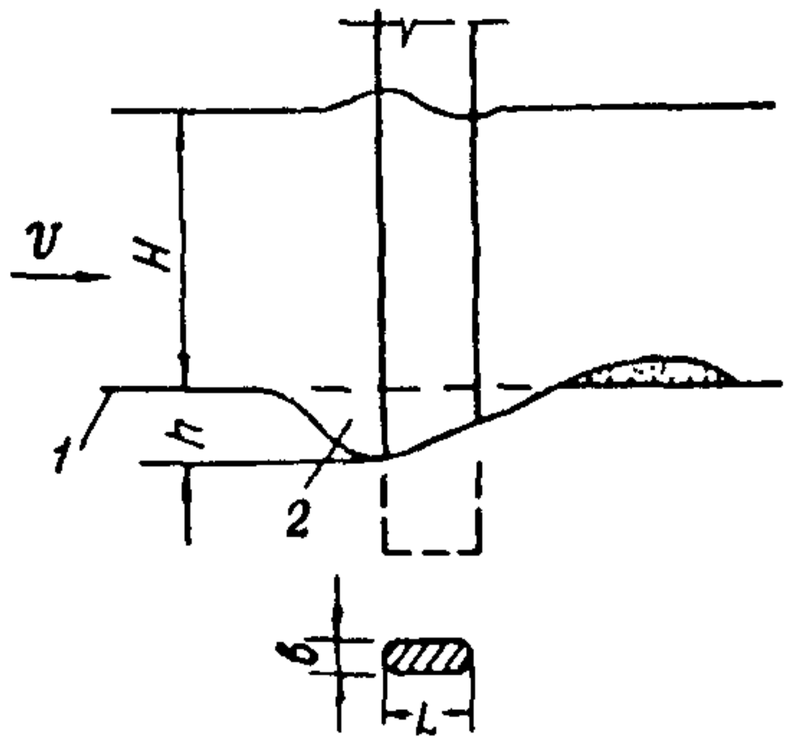

Рис.1. Схема местного размыва русла у опоры:
1–линия общего размыва;
2–воронка размыва

1.3. На меандрирующих реках глубина местного размыва у речных опор моста должна приниматься с учетом возможности перемещения главного русла к данной опоре.

1.4. Глубину местного размыва рассчитывают на основании исходных данных, получаемых в результате изысканий (геодезических съемок, гидрометрических и инженерно-геологических работ, включая лабораторные анализы грунтов) и при разработке проекта:

характеристик потока у опор: средней глубины H; скорости потока у опоры v; направления течения по отношению к оси опоры, выраженного углом α. Эти параметры потока определяются для той вероятности паводка, на которую проектируется мостовой переход;

характеристик грунтов в пределах ожидаемого местного размыва: для несвязных грунтов – гранулометрического состава, для связных грунтов – объемного и удельного веса, степени влажности, показателя консистенции (текучести) J_L, коэффициента пористости e_n, удельного сцепления C_p;

общих схем опор с указанием размеров (ширины, высоты и длины) их элементов выше и ниже обреза фундаментов, очертания в плане и профиле, сечения свай (свай-оболочек) и схемы их размещения.

1.5. В некоторых случаях результаты расчетов могут быть сравнены с данными кадастра натурных измерений /2/ либо с замерами глубин местных размывов, выполненными проектной организацией у мостов, расположенных на той же реке вблизи проектируемого перехода.

2. Метод расчета глубины местного размыва

2.1. Расчетная формула для определения глубины местного размыва выбирается в зависимости от конфигурации поперечного сечения (типа) опоры (рис.2) и режима наносов, определяемого критерием $v \gtrless v_0$ (где v_0 - неразмывающая скорость для грунта (наносов), слагающего русло).

2.2. Для опор простой формы - постоянного по высоте сечения (см.рис.2, а) или на нешироком фундаменте (с соотношением ширин $b_1/b_2 \leqslant 1,2$), выступающем над дном на $e \leqslant H/3$ (см.рис.2, б), - определение глубины местного размыва производится по формулам:

при поступлении наносов в воронку размыва ($v > v_0$)

$$h = 1,1\sqrt{b_{cp}H}\left(\frac{v}{v_0}\right)^n \overline{K}_\varphi \overline{K}_\alpha \quad , \qquad (1)$$

при отсутствии наносов в потоке (осветленный поток, $v \leqslant v_0$)

$$h = 1,1\, b_{cp}^{0,6} H^{0,4}\left(\frac{v}{v_0}\right)^n \overline{K}_\varphi \overline{K}_\alpha \quad , \qquad (2)$$

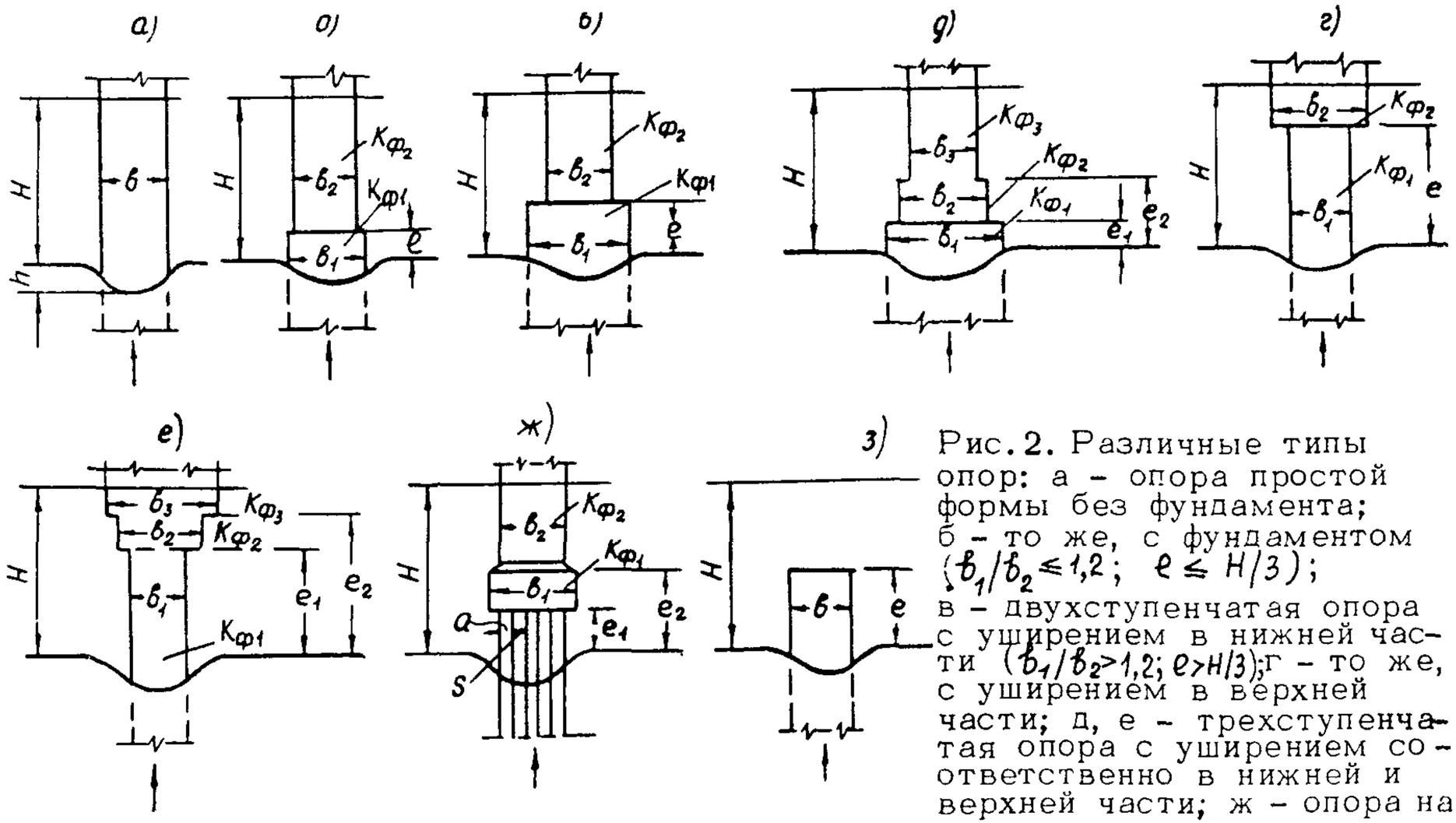

Рис. 2. Различные типы опор: а – опора простой формы без фундамента; б – то же, с фундаментом ($b_1/b_2 \leq 1{,}2$; $e \leq H/3$); в – двухступенчатая опора с уширением в нижней части ($b_1/b_2 > 1{,}2$; $e > H/3$); г – то же, с уширением в верхней части; д, е – трехступенчатая опора с уширением соответственно в нижней и верхней части; ж – опора на высоком ростверке; з – затопленная преграда

где H – средняя глубина потока у опоры, м;

$v_в$ – средняя взмучивающая скорость турбулентного потока перед опорой, м/с, являющаяся функцией донной взмучивающей скорости $v_{вg}$;

n – степенной параметр;

$\bar{K}_ф, \bar{K}_\alpha$ – средние коэффициенты соответственно формы опоры и косины потока.

2.3. Для предварительных стадий проектирования глубину местного размыва у опоры можно определять по упрощенной формуле /2/:

$$h = a_0 \sqrt{bH},$$

где a_0=0,7 – для равнинных и полугорных рек, кроме рек с высокими скоростями течения и гладкими руслами (с диаметром частиц наносов менее 0,25 мм) типа Амударьи, для которых a_0 =1÷1,1.

2.4. Средняя ширина опоры $b_{ср}$ определяется по формуле (см. рис. 2, б)

$$b_{ср} = \frac{b_1 e + b_2 (H - e)}{H}, \qquad (3)$$

где e – возвышение фундамента над поверхностью дна, м.

Аналогичным образом определяют и среднюю длину опоры, для чего в формулу (3) вместо значения ширины подставляют длину L.

2.5. Средний коэффициент формы опоры рассчитывают по формуле

$$\bar{K}_ф = \frac{K_{ф_1} b_1 e + K_{ф_2} b_2 (H - e)}{b_1 e + b_2 (H - e)}, \qquad (4)$$

где $K_{ф_1}$ и $K_{ф_2}$ – коэффициенты формы, принимаемые по табл. 1.

Средний коэффициент косины потока $\bar{K}_\alpha$ определяется по средним длине и ширине опоры.

Таблица 1

Форма поперечного сечения опоры		K_φ
Круглая		1,00
Прямоугольная		1,24
Квадратная		1,46
С полуциркульными торцами (овальная)		0,85
Заостренная:		
$\theta = 120^\circ$	θ	1,22
$\theta = 90^\circ$		1,00
$\theta = 60^\circ$		0,73
$\theta = 30^\circ$		0,59

2.6. При опорах с переменными по высоте сечениями (см.рис.2, в-е) глубина местного размыва определяется по следующим формулам:

а) опора из двух элементов (см.рис.2, в, г):

при режиме наносов $v > v_0$

$$h = \sqrt{H}\left(\frac{v}{v_в}\right)^n \left[\sqrt{b_1}\, Z\, K_{\varphi_1} K_{\alpha_1} + \sqrt{b_2}\,(1-Z)\, K_{\varphi_2} K_{\alpha_2}\right] ; \qquad (5)$$

при режиме наносов $v \leqslant v_0$

$$h = H^{0,4}\left(\frac{v}{v_в}\right)^n \left[b_1^{0,6} Z\, K_{\varphi_1} K_{\alpha_1} + b_2^{0,6}\,(1-Z)\, K_{\varphi_2} K_{\alpha_2}\right] ; \qquad (6)$$

б) опора из трех элементов (см.рис.2, д, е):

при режиме наносов $v > v_0$

$$h = \sqrt{H}\ \left(\frac{v}{v_в}\right)^n \left[\sqrt{b_1}\ Z_1\, K_{\varphi_1} K_{\alpha_1} + \sqrt{b_2}\ (Z_2 - Z_1)\, K_{\varphi_2} K_{\alpha_2} + \right.$$

$$\left. + \sqrt{b_3}\,(1 - Z_2)\ K_{\varphi_3} K_{\alpha_3}\right] ; \qquad (7)$$

при режиме наносов $v \leqslant v_0$

$$h = H^{0,4}\left(\frac{v}{v_б}\right)^n \left[b_1^{0,6} z_1 K_{\varphi 1} K_{\alpha 1} + b_2^{0,6} (z_2 - z_1) K_{\varphi 2} K_{\alpha 2} + \right.$$

$$\left. + b_3^{0,6} (1 - z_2) K_{\varphi 3} K_{\alpha 3} \right], \qquad (8)$$

где $z = \left(\frac{e}{H}\right)^{0,25}$; $z_1 = \left(\frac{e_1}{H}\right)^{0,25}$; $z_2 = \left(\frac{e_2}{H}\right)^{0,25}$;

K_φ, K_α – коэффициенты соответственно формы и косины для элементов сечения опоры.

Если опоры состоят из элементов одной формы, то в формулах (5)–(8) коэффициент K_φ выносится за скобку.

Для опор из четырех и более элементов формулы глубины местного размыва могут быть выведены на основании литературных источников /2, 3/.

2.7. Глубина местного размыва у опор на высоком свайном ростверке (см. рис. 2, ж) определяется по формулам:

при поступлении наносов в воронку размыва ($v > v_0$)

$$h = \sqrt{H}\left(\frac{v}{v_б}\right)^n \left[\sqrt{b_1}(z_2 - z_1) K_{\varphi 1} K_{\alpha 1} + \sqrt{b_2}(1 - z_2) K_{\varphi 2} K_{\alpha 2} + \right.$$

$$\left. + \frac{a A_N}{\sqrt{S + a}} z_1 K_{\varphi c} K_{\alpha c} \right]; \qquad (9)$$

при отсутствии наносов в потоке ($v \leqslant v_0$)

$$h = H^{0,4}\left(\frac{v}{v_б}\right)^n \left[b_1^{0,6}(z_2 - z_1) K_{\varphi 1} K_{\alpha 1} + b_2^{0,6}(1 - z_2) K_{\varphi 2} K_{\alpha 2} + \right.$$

$$\left. + a^{0,6} A_N \sqrt{\frac{a}{S + a}} z_1 K_{\varphi c} K_{\alpha c} \right], \qquad (10)$$

где a – диаметр свай-оболочек, м;

S – расстояние в свету между сваями-оболочками, м;

$K_{\varphi c}$ – коэффициент формы свай; для круглых $K_{\varphi c}$ = = 1, прямоугольных – $K_{\varphi c}$ = 1,24, квадратных – $K_{\varphi c}$ = 1,46;

$K_{\alpha_1}, K_{\alpha_2}, K_{\alpha c}$ – коэффициенты косины потока соответственно для элементов опоры и свай;

A_N – коэффициент пропорциональности, зависящий от числа свай в ряду поперек потока; при одной свае A_1 =1, двух – A_2 =1,6; трех – A_3 = 2,1, четырех – A_4 = 2,5.

Согласно исследованиям И.В.Дитца /7/ при общей ширине ряда свай более $(4 \div 5)a$ образуются две самостоятельные воронки размыва. Это ограничение, вплоть до проверки экспериментальных данных И.В.Дитца, и рекомендуется принимать за верхний предел коэффициента A_N, т.е. $A_N \leqslant 2,5$.

2.8. В неустойчивой зоне режима наносов ($v = (0,95 \div 1,0)\, v_0$) глубину размыва у опор с отношением размеров $b/H < 1$ рекомендуется определять как для режима наносов $v > v_0$.

2.9. Глубина местного размыва у затопляемых преград постоянной ширины (см.рис.2,з) определяется по формулам:

при поступлении наносов в воронку размыва ($v > v_0$)

$$h = 1,1\sqrt{bH}\left(\frac{v}{v_b}\right)^n Z K_\varphi K_\alpha ; \qquad (11)$$

при отсутствии наносов в потоке ($v \leqslant v_0$)

$$h = 1,1\, b^{0,6} H^{0,4}\left(\frac{v}{v_b}\right)^n Z K_\varphi K_\alpha , \qquad (12)$$

где $Z = \left(\frac{e}{H}\right)^{0,25}$ (см.п.2.6);

e – высота преграды над дном, м.

2.10. Неразмывающую скорость v_0 (м/с) для несвязных грунтов рассчитывают по формуле

$$v_0 = 3{,}6\sqrt[4]{Hd}\ , \qquad (13)$$

где H – средняя глубина потока, м;
d – средний диаметр частиц наносов, м.

Скорость v_0 можно также определять по рис.3.

2.11. Глубину потока H у опор определяют как полусумму средних глубин в смежных с опорой пролетах моста.

2.12. Донная взмучивающая скорость $v_{в.д}$ (м/с) перед опорой определяется по формулам:

для русел, сложенных наносами с крупностью частиц $d \geqslant 0{,}20$ мм:

$$v_{в.д} = \sqrt[3]{g\omega H}\ ; \qquad (14)$$

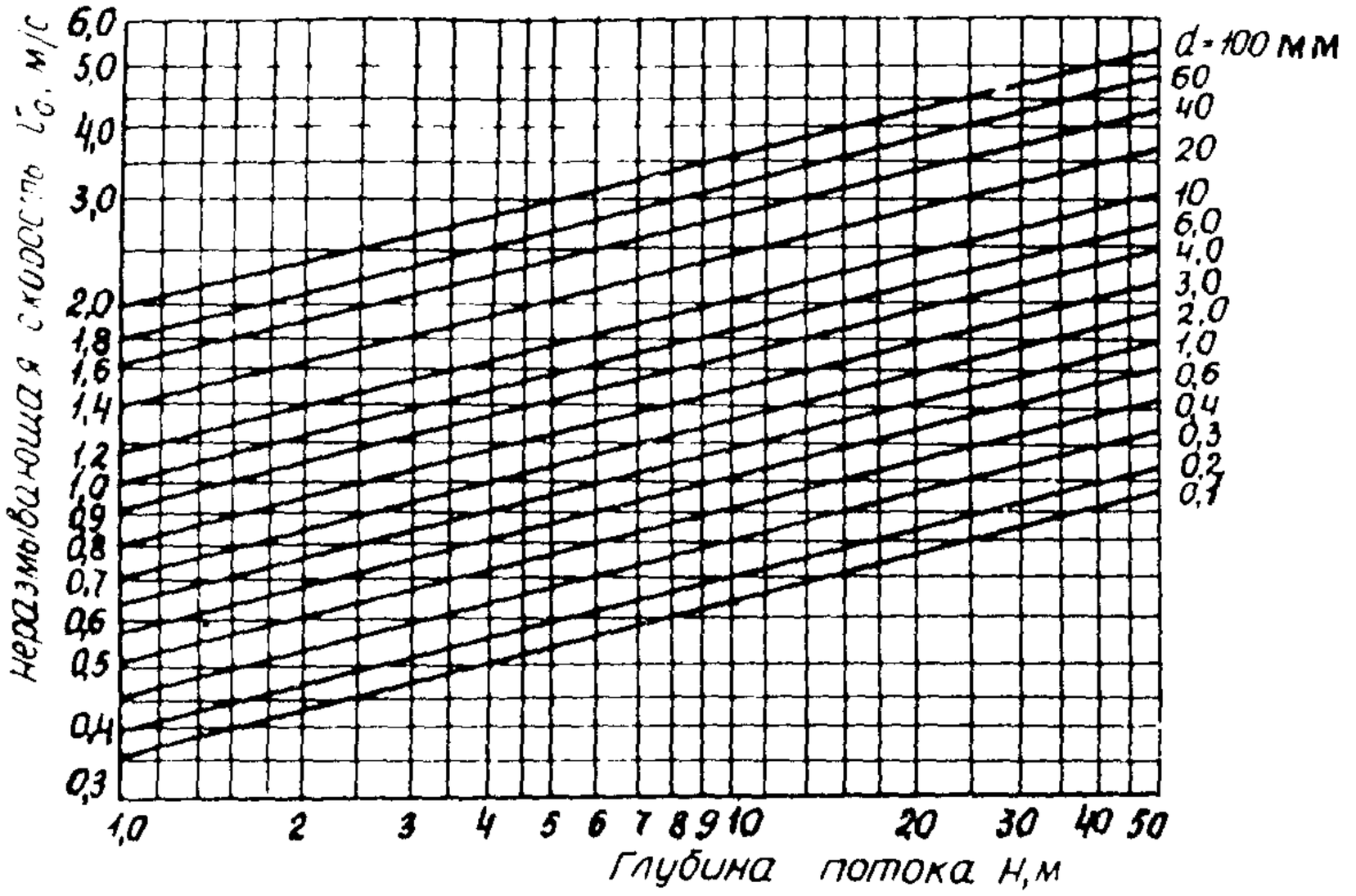

Рис.3. График для определения неразмывающей скорости v_0 для несвязных грунтов

для гладких русел ($0,05 < d < 0,20$ мм):

$$v_{в.g} = 4,78\sqrt[3]{gHd} \cong 10,2\sqrt[3]{Hd}, \qquad (15)$$

где g – ускорение силы тяжести;

w – гидравлическая крупность частиц наносов (скорость их падения в стоячей воде), м/с; определяется по табл.2 в зависимости от диаметра частиц грунта d.

2.13. Средняя взмучивающая скорость $v_в$ (м/с) рассчитывается как

$$v_в = v_{в.g}\left(\frac{H}{d}\right)^{0,06}. \qquad (16)$$

Взмучивающую скорость $v_в$ можно также определить по графику рис.4. Донную взмучивающую скорость в этом случае находят из формулы (16):

$$v_{вg} = v_в\left(\frac{d}{H}\right)^{0,06}.$$

2.14. Степенной параметр n определяют по формуле

$$n = 0,50 + 0,24\frac{v}{v_{в.g}}. \qquad (17)$$

Если рассчитанное значение n больше 1, принимают $n = 1$ или полученное значение n обосновывают натурными данными.

Для предварительных расчетов разрешается принимать $n = 1$ при $v/v_{вg} > 1$ и $n = 0,67$ при $v/v_{в.g} \leqslant 1$.

2.15. Коэффициент косины потока K_α определяют в зависимости от угла косины α между направлением набегающего на опору потока и осью опоры:

$$K_\alpha = 1 + \left[1,22 - \frac{1,12}{\sqrt{\left(\frac{H}{в}+0,75\right)^3}}\right] f, \qquad (18)$$

где f – коэффициент, определяемый по рис.5 в зависимости от значений $L/в$ и α.

При $\alpha < 10^\circ$ принимают $K_\alpha = 1$.

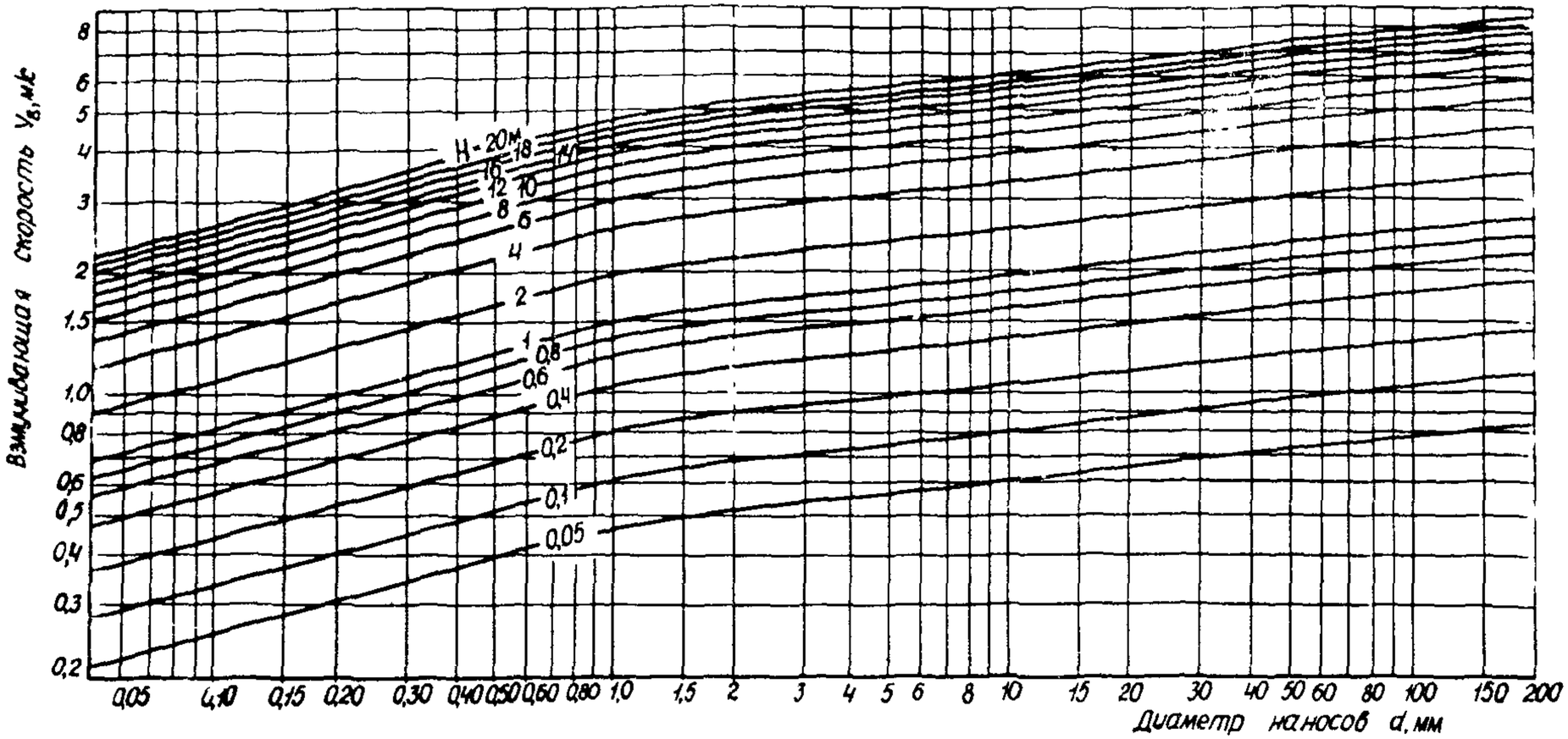

Рис.4. График для определения средней взмучивающей скорости $v_в$ для несвязных грунтов

Таблица 2

d, мм	w, м/с	d, мм	w, м/с
0,01	0,00007	6	0,270
0,03	0,00062	7	0,297
0,05	0,00178	8	0,310
0,08	0,00443	9	0,330
0,10	0,00692	10	0,352
0,15	0,01557	11	0,360
0,20	0,02160	12	0,378
0,25	0,02700	13	0,390
0,30	0,03240	14	0,415
0,35	0,03800	15	0,430
0,40	0,04320	16	0,439
0,45	0,04750	17	0,451
0,50	0,05400	20	0,492
0,55	0,05950	25	0,548
0,60	0,06480	30	0,600
0,65	0,06950	40	0,689
0,70	0,07300	50	0,769
0,75	0,07750	60	0,842
0,80	0,08070	80	0,969
0,85	0,08750	100	1,080
0,90	0,09000	120	1,190
0,95	0,09400	140	1,280
1,00	0,09600	160	1,370
1,50	0,12600	180	1,450
2,00	0,15300	200	1,520
2,50	0,17700	250	1,700
3,00	0,19300	300	1,860
3,50	0,21100	350	2,010
4,00	0,22300	400	2,150
5,00	0,24900	500	2,400

2.16. При наличии лобовой полки элемента опоры шириной $\Delta L \geq \frac{e}{6}$, возвышающейся над дном на величину e, следует учитывать снижение глубины местного размыва введением коэффициента $K_п$:

$$K_п = 0,75 + 0,25\sqrt{e/H} \quad . \qquad (19)$$

При ширине полки $\Delta L < \frac{e}{6}$ значение $K_п$ следует увеличивать простой интерполяцией по закону треугольника с учетом того, что при отсутствии полки $K_п = 1$.

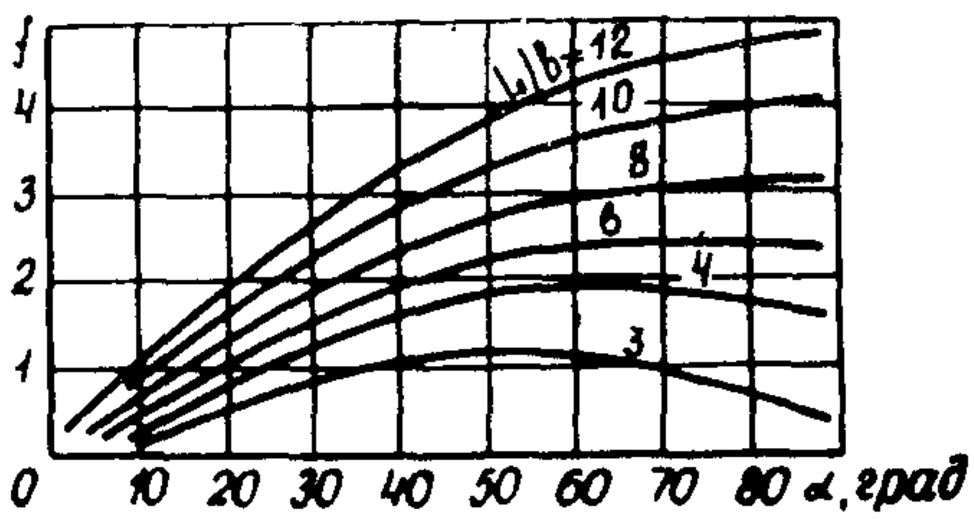

Рис.5. График для определения коэффициента f в формуле коэффициента косины K_α

2.17. Большое количество натурных и опытных данных /2/ позволяет установить ориентировочные границы применимости предложенного метода расчета местного размыва. Диапазон изменения расчетных характеристик находится в следующих пределах: глубины потока - от 0,05 до 20 м, среднего диаметра частиц нано - сов - от 0,1 до 150 мм, глубины местного размыва - от 0,05 до 10 м.

3. Особенности расчета глубины местного размыва при разных грунтах русла

Однородные несвязные грунты

3.1. При расчете глубины местного размыва грунт считается *условно однородным, если*

$$\frac{d_{85}}{d} \leq 1,2 , \qquad (20)$$

где d_{85} – диаметр частиц грунта, мм, меньше которого в пробе содержится 85% частиц по массе; определяется по графику гранулометрического состава;

d – средний диаметр частиц грунта, мм;

$$d = \frac{\sum p_i d_i}{100}, \qquad (21)$$

d_i – средний диаметр отдельной фракции, мм, который определяется как среднее арифметическое максимального ($d_{i\,max}$) и минимального ($d_{i\,min}$) диаметров частиц данной фракции;

$$d_i = \frac{d_{i\,max} + d_{i\,min}}{2};$$

p_i – массовая доля фракций, %.

Значения d_i и p_i определяют на основании гранулометрического анализа проб, отобранных из буровых скважин (предпочтительно в местах возведения опор).

3.2. При однородном грунте неразмывающую и взмучивающую скорости определяют по среднему диаметру частиц d.

Слоистое строение несвязных грунтов

3.3. Определение глубины местного размыва русла, сложенного слоями различных грунтов, производят, принимая для неразмывающей и взмучивающей скоростей диаметры d или d_{85} частиц в соответствующих слоях грунта. Расчет выполняют в следующем порядке: находят глубину размыва для первого слоя; если глубина размыва превосходит его толщину, расчет проводят для второго слоя, считая, что он выходит на поверхность, и так до тех пор, пока не будет найден слой, в котором размыв прекратится.

Если при расчете одного из нижних слоев глубина размыва окажется меньше суммы толщин вышележа -

щих слоев, то это означает, что размыв **прекратился** на поверхности рассматриваемого слоя.

Разнородные несвязные грунты

3.4. Расчет глубины местного размыва при $d_{85}/d>1,2$ производится по неразмывающим скоростям, определяемым по диаметру частиц грунта d_{85}. Частицы с $d_{85}>d$ образуют отмостку, ограничивающую глубину размыва.

Неразмывающая скорость v_0, которая характеризует устойчивость наносов за пределами резко турбулентного потока у опоры, рассчитывается по среднему диаметру d.

Связные грунты

3.5. При определении глубины местного размыва в руслах из связных грунтов различают следующие виды расчета в зависимости от режима наносов:

а) поток влечет более 0,1% мелких песчаных частиц наносов. В этом наиболее распространенном случае расчет осуществляется по формулам для режима наносов $v>v_0$ (см. пп.2.1, 2.7, 2.14, 2.16) с дополнительной проверкой глубины размыва в слое мелких песчаных частиц. За расчетную глубину местного размыва принимают меньшую из этих двух определений;

б) поток не содержит песчаных наносов (осветленный). Расчет проводится по формулам для режима наносов $v\leq v_0$.

3.6. Донную ($v_{в.д.св}$) и среднюю ($v_{в.св}$) взмучивающие скорости для связных грунтов определяют по формулам:

$$v_{в.д.св}=1,40H^{0,08}\,v_{0.св}\;; \qquad (22)$$

$$v_{в.св} = 2{,}0\,H^{0{,}14}\,v_{0.св}\,, \qquad (23)$$

где $v_{0.св}$ – неразмывающая скорость для связного грунта, м/с, определяемая по преобразованной формуле Ц.Е.Мирцхулавы:

$$v_{0.св} = \frac{0{,}4}{\varepsilon}(3{,}34 + \lg H)\sqrt{0{,}15 + C_p}\;; \qquad (24)$$

ε – коэффициент снижения неразмывающей скорости; когда поток влечет мелкие песчаные частицы, $\varepsilon = 1{,}4$; в случае осветленного потока $\varepsilon = 1$;

C_p – расчетное сцепление в грунте, 10^4Па (тс/м^2).

В целях ускорения расчета по формуле (24) значения $v_{0.св}$ можно определять по графику рис.6. Для получения $v_{0.св}$ при $\varepsilon = 1$ значения $v_{0.св}$, полученные по рис.6, следует умножить на 1,4.

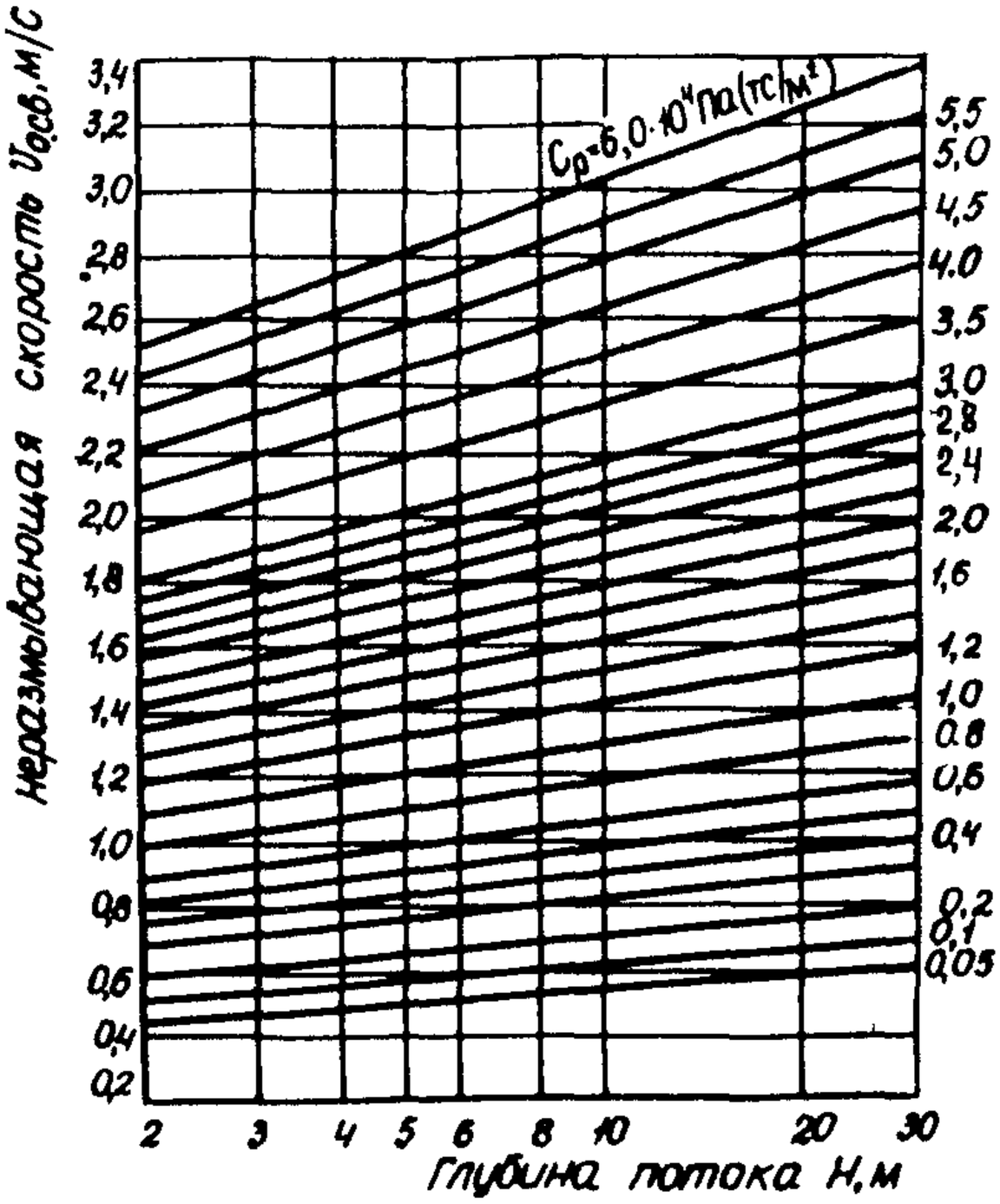

Рис.6. График для определения неразмывающей скорости $v_{0.св}$ связных грунтов при $\varepsilon = 1{,}4$

3.7. Расчетное сцепление C_p при испытании образцов грунта определяют по формуле

$$C_p = \frac{C_н}{\gamma_g}, \qquad (25)$$

где $C_н$ – нормативное значение сцепления глинистого грунта, 10^4Па, при степени влажности $S_r \geq 0{,}8$;

γ_g – коэффициент надежности по грунту, устанавливаемый в зависимости от изменчивости прочностных характеристик грунта и от числа определений при доверительной вероятности $\alpha = 0{,}90$.

3.8. Для получения коэффициента надежности по грунту γ_g и расчетного значения C_p могут быть использованы стандартные полевые и лабораторные методы испытаний грунтов на сдвиг и рекомендации СНиП 2.02.01-83.

Кроме того, могут быть использованы значения сцепления, определяемые методом вдавливания в грунт сферического штампа (прибор Н.А.Цытовича) в полевых условиях.

При отсутствии данных о сцеплении C_p для предварительных стадий проектирования принимаются нормативные значения $C_н$ по прил.1.

Приложение 1

НОРМАТИВНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ УДЕЛЬНОГО СЦЕПЛЕНИЯ $C_н$ ПЫЛЕВАТО-ГЛИНИСТЫХ НЕЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ (ПО СНиП 2.02.01-83)

Вид и консистенция грунта	Пределы изменения консистенции J_L	Нормативное удельное сцепление $C_н$, 10^4 Па ($тс/м^2$), при коэффициенте пористости $e_п$						
		0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,05
Супеси:								
мягкопластичные	$0,25 < J_L \leqslant 0,75$	1,9	1,5	1,3	1,1	0,9	–	–
полутвердые	$0 \leqslant J_L \leqslant 0,25$	2,1	1,7	1,5	1,3	–	–	–
Суглинки:								
мягкопластичные	$0,5 < J_L \leqslant 0,75$	–	–	2,5	2,0	1,6	1,4	1,2
тугопластичные	$0,25 < J_L \leqslant 0,5$	3,9	3,4	2,8	2,3	1,8	1,5	–
полутвердые	$0 \leqslant J_L \leqslant 0,25$	4,7	3,7	3,1	2,5	2,2	1,9	–
Глины:								
мягкопластичные	$0,5 < J_L \leqslant 0,75$	–	–	4,5	4,1	3,6	3,3	2,9
тугопластичные	$0,25 < J_L \leqslant 0,5$	–	–	5,7	5,0	4,3	3,7	3,2
полутвердые	$0 \leqslant J_L \leqslant 0,25$	–	8,1	6,8	5,4	4,7	4,1	3,6

Примечания: 1. Характеристики приведены для грунтов, содержащих не более 5% органического вещества и имеющих степень влажности $S_r \geqslant 0,8$.

2. Для грунтов с промежуточными значениями $e_п$ допускается определять значение $C_н$ по интерполяции.

3. Если значения $e_п$, J_L и S_r грунтов выходят за пределы, предусмотренные таблицей, то характеристику $C_н$ следует определять по данным непосредственных испытаний этих грунтов.

Если значения $e_п$, J_L, S_r меньше нижних предельных значений, приведенных в таблице, то допускается в запас надежности принимать $C_н$ по таблице, ориентируясь на нижние пределы характеристик $e_п$, J_L и S_r.

Приложение 2

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ГЛУБИНЫ МЕСТНОГО РАЗМЫВА У ОПОР МОСТОВ

Однородные несвязные грунты

Пример 1. Глубина потока $H = 5$ м, скорость у опоры $v = 0{,}63$ м/с; опора – массивная (см. рис. 2, б), овальной формы, шириной $b_2 = 4{,}2$ м, на выступающем над дном ($e = 0{,}4$ м) фундаменте шириной $b_1 = 4{,}6$ м; длина опоры $L = 12$ м. Косина потока отсутствует ($\alpha = 0$; $K_\alpha = 1$). Русло сложено мелким песком, гранулометрический состав которого приведен в табл. 1 и характеризуется гранулометрической кривой (рис. 1 настоящего приложения).

Таблица 1

Фракция песка, мм	Средний диаметр частиц, мм	Массовая доля фракции p_i, %	$p_i d_i$
0,5–0,25	0,375	15,00	5,63
0,25–0,10	0,175	36,79	6,44
0,1–0,05	0,075	39,00	2,92
0,05–0,01	0,030	6,40	0,19
<0,01	0,007	2,81	0,02
			$\sum p_i d_i = 15{,}2$

Средний диаметр частиц наносов определяем по формуле (21):

$$d = \frac{15{,}2}{100} = 0{,}152 \sim 0{,}15 \text{ мм}.$$

По рис. 1 находим, что $d_{85} = 0{,}175$ мм. Так как $d_{85}/d = \frac{0{,}175}{0{,}15} = 1{,}17 < 1{,}2$, т.е. грунт однородный, расчет производим по диаметру $d = 0{,}15$ мм.

Определяем неразмывающую скорость по формуле (13):

$$v_0 = 3{,}6\sqrt[4]{5{,}0 \cdot 0{,}00015} = 0{,}60 \text{ м/с} < 0{,}63 \text{ м/с},$$

т.е. имеем случай поступления наносов в воронку размыва ($v > v_0$).

Так как нижняя часть опоры имеет небольшое уширение – $b_1/b_2 = 4{,}6/4{,}2 = 1{,}09 < 1{,}2$ и $e = 1{,}0$ м $< \frac{H}{3} = \frac{5}{3} = 1{,}67$ м, расчет производим по средней ширине опоры, которую определяем по формуле (3):

$$b_{ср} = \frac{4{,}6 \cdot 1{,}0 + 4{,}2 \cdot 4{,}0}{5{,}0} = 4{,}3 \text{ м}.$$

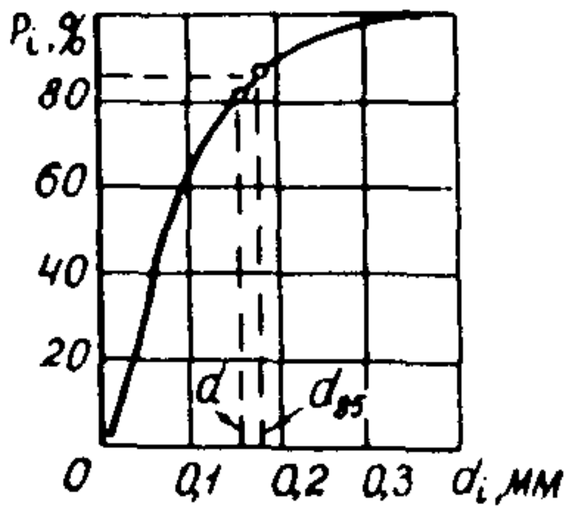

Рис. 1. График гранулометрического состава мелкого песка

Зная, что $d < 0{,}20$ мм, по формулам (15) и (16) вычисляем донную и среднюю взмучивающие скорости потока перед опорой:

$$v_{в.д} = 10{,}2\sqrt[3]{5{,}0 \cdot 0{,}00015} = 0{,}93 \text{ м/с};$$

$$\frac{H}{d} = \frac{5{,}0}{0{,}00015} = 33333; \quad \left(\frac{H}{d}\right)^{0{,}06} = 1{,}86;$$

$$v_в = 0{,}93 \cdot 1{,}86 = 1{,}73 \text{ м/с}.$$

По формуле (17) определяем степенной параметр n:

$$n = 0{,}5 + 0{,}24 \cdot \frac{0{,}63}{0{,}93} = 0{,}5 + 0{,}16 = 0{,}66.$$

Глубина воронки местного размыва по формуле (1) при $K_ф = 0{,}85$ (см. табл. 1) составит:

$$h = 1{,}1\sqrt{4{,}3 \cdot 5} \cdot \left(\frac{0{,}63}{1{,}73}\right)^{0{,}66} \cdot 0{,}85 = 1{,}1 \cdot 4{,}63 \cdot 0{,}51 \cdot 0{,}85 = 2{,}21 \text{ м}.$$

Заметим, что для предварительных расчетов (см. п. 2.14) степенной параметр n (при $\frac{v}{v_{в.д}} < 1$) был бы принят равным 0,67, что в данном случае не изменило бы глубину h.

Пример 2. Исходные данные те же, что в примере 1, но имеется косина потока $\alpha = 20^\circ$, а русло сложено однородными среднезернистыми песками со средним диаметром частиц $d = 0{,}35$ мм.

Неразмывающая скорость в этом случае составит:

$$v_0 = 3{,}6\sqrt[4]{5{,}0 \cdot 0{,}00035} = 0{,}74 \text{ м/с}.$$

Поскольку $v < v_0$, т.е. наносы в воронку размыва не поступают, расчет ведем по формуле (2).

Донную и среднюю взмучивающие скорости потока перед опорой определяем по формулам (14) и (16) при гидравлической крупности $w = 0{,}038$ м/с для $d = 0{,}35$ мм (см. табл. 2):

$$v_{в.д} = \sqrt[3]{9{,}81 \cdot 0{,}038 \cdot 5{,}0} = 1{,}23 \text{ м/с};$$

$$\frac{H}{d} = \frac{5{,}0}{0{,}00035} = 14285; \quad \left(\frac{H}{d}\right)^{0{,}06} = 1{,}77;$$

$$v_в = 1{,}23 \cdot 1{,}77 = 2{,}17 \text{ м/с}.$$

По формуле (17) вычисляем степенной параметр n:

$$n = 0{,}5 + 0{,}24\frac{0{,}63}{1{,}23} = 0{,}5 + 0{,}12 = 0{,}62.$$

Определяем коэффициент K_α. Для этого сначала при $L/b = \frac{12}{4{,}2} = 2{,}9$ и $\alpha = 20^\circ$ по рис. 5 находим $f = 0{,}4$.

Затем по формуле (18) рассчитываем K_α:

$$K_\alpha = 1 + \left[1{,}22 - \frac{1{,}12}{\sqrt{\left(\frac{5{,}0}{4{,}2} + 0{,}75\right)^3}}\right] \cdot 0{,}4 = 1{,}32.$$

Глубина местного размыва составит:

$$h = 1{,}1 \cdot 4{,}3^{0{,}6} \cdot 5{,}0^{0{,}4} \left(\frac{0{,}63}{2{,}17}\right)^{0{,}62} \cdot 0{,}85 \cdot 1{,}32 = 2{,}59 \text{ м}.$$

Примечание. Для ориентировочных расчетов при возведении чисел в дробную степень можно использо - вать график рис. 2 настоящего приложения.

Пример 3. Глубина потока $H = 9$ м, скорость у опоры $v = 1{,}9$ м/с. Опора - массивная, из трех элементов (см. рис. 2, д): нижняя часть - из прямоугольных эле - ментов ($K_{ф_1} = K_{ф_2} = 1{,}24$) шириной $b_1 = 9$ м и $b_2 = 7$ м; верхняя - овальной формы ($K_ф = 0{,}85$) шириной $b_3 = 5{,}1$ м. Уступы опоры имеют высоту от дна $e_1 = 2$ м и $e_2 = 5$ м. В уровне первого уступа ($e_1 = 2$ м) имеется лобовая полка $\Delta L_1 = 1$ м.

Косина потока отсутствует. Русло сложено однородным мелким песком со средним диаметром частиц $d = 0,22$ мм.

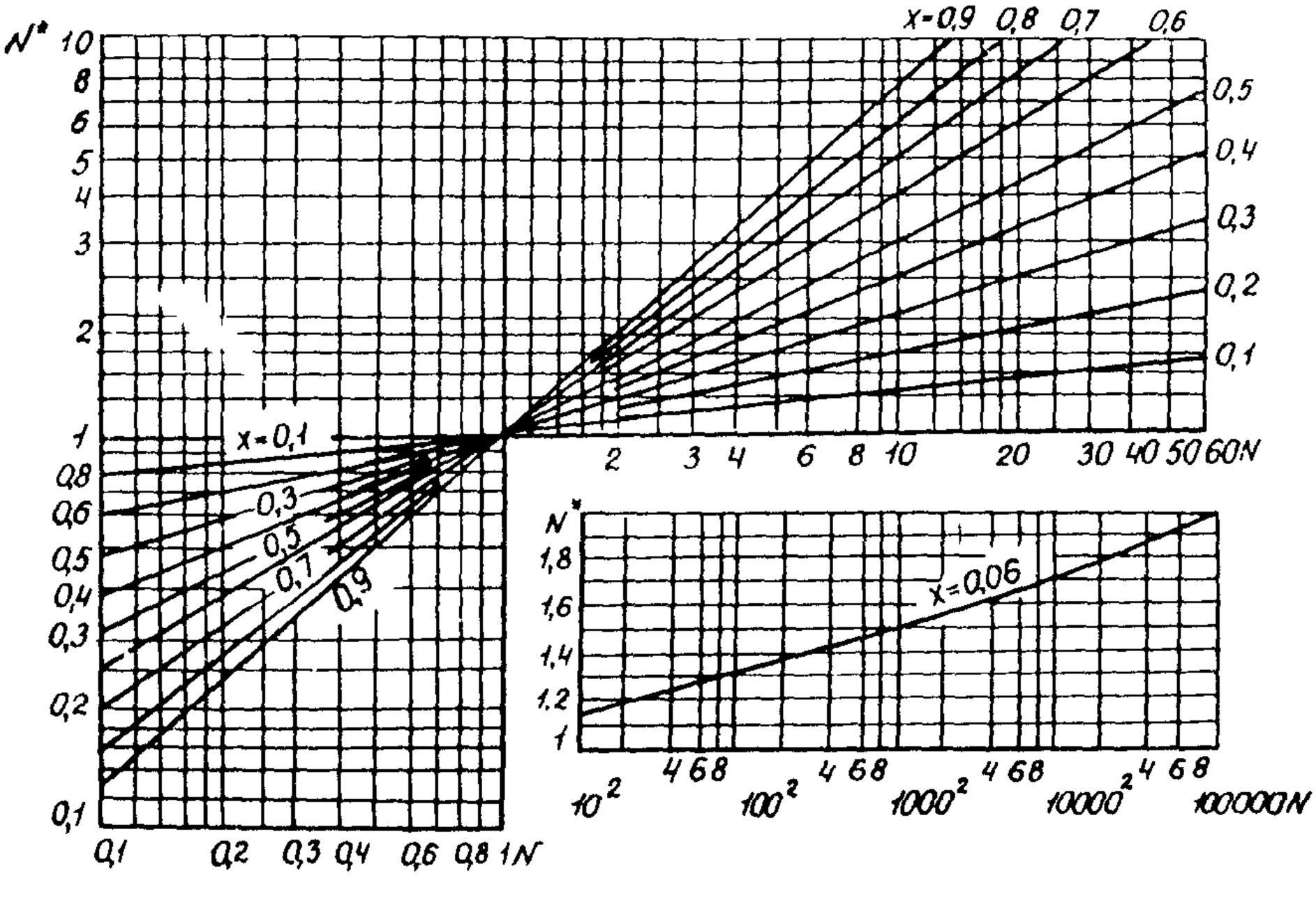

Рис. 2. График для возведения чисел в степень

Неразмывающая скорость по формуле (13) составит:

$$v_0 = 3,6 \sqrt[4]{9 \cdot 0,00022} = 0,76 \text{ м/с} < 1,90.$$

Имеем случай $v > v_0$, поэтому глубину местного размыва рассчитываем по формуле (5). Вначале определяем донную и среднюю взмучивающие скорости перед опорой:

$$v_{s.g} = \sqrt[3]{9,81 \cdot 0,0238 \cdot 9} = 1,28 \text{ м/с};$$

$$\frac{H}{d} = \frac{9,0}{0,00022} = 40909; \qquad \left(\frac{H}{d}\right)^{0,06} = 1,89;$$

$v_{\ell} = 1,28 \cdot 1,89 = 2,42$ м/с.

Степенной параметр находим по формуле (17):

$$n = 0,5 + 0,24 \frac{1,90}{1,28} = 0,86.$$

Определяем относительные высоты элементов опоры и значения коэффициентов z:

$\frac{e_1}{H} = \frac{2}{9} = 0,22$; $z_1 = 0,22^{0,25} = 0,68$; $\frac{e_2}{H} = \frac{5}{9} = 0,55$;

$z_2 = 0,55^{0,25} = 0,86$.

Коэффициент снижения размыва $K_п$ из-за наличия лобовой полки $\Delta L_1 = 1$ м вычисляем по формуле (19):

$$K_п = 0,75 + 0,25\sqrt{\frac{2}{9}} = 0,87.$$

Так как ширина полки $\Delta L_1 < \frac{b_2}{b} = \frac{7}{6} = 1,17$, коэффициент $K_п$ уточняем интерполяцией между ΔL_1 и $\frac{b_2}{b}$:

$$K_п^* = K_п + \frac{(1 - K_п)\left(\frac{b_2}{b} - \Delta L_1\right)}{\frac{b_2}{b}} = 0,87 + \frac{(1-0,87)\ (1,17-1,0)}{1,17} = 0,89.$$

Наконец определяем глубину местного размыва по формуле (7):

$$h = \sqrt{9} \cdot \left(\frac{1,90}{2,42}\right)^{0,86} \left[\sqrt{9} \cdot 0,68 \cdot 1,24 + \sqrt{7}\,(0,86-0,68) \cdot 1,24 + \right.$$

$$\left. + \sqrt{5,1}\,(1-0,86) \cdot 0,85\right] \cdot 0,89 = 8,24 \cdot 0,89 = 7,33 \text{ м}.$$

Пример 4. Рассчитаем глубину размыва у опоры при тех же параметрах потока и размерах опоры, что и в примере 3, но опору перевернем на 180° таким образом, чтобы уширенная ее часть оказалась вверху (см.рис.2, е). Тогда ширина элементов опоры $b_1 = 5,1$ м, $b_2 = 7$ м и $b_3 = 9$ м, а высота уступов над дном и параметры z будут иметь значения: $e_1 = 4$ м, $z_1 = \left(\frac{4}{9}\right)^{0,25} = 0,82$ и $e_2 = 7$ м; $z_2 = \left(\frac{7}{9}\right)^{0,25} = 0,94$. Глубину местного размыва у опоры определим по формуле (7) при параметре переноса наносов (см.пример 3) $\left(\frac{v}{v_{\ell}}\right)^n = \left(\frac{1,90}{2,42}\right)^{0,86} = 0,81$:

$h = \sqrt{9} \cdot 0{,}81 \left[\sqrt{5{,}1} \cdot 0{,}82 \cdot 0{,}85 + \sqrt{7}(0{,}94-0{,}82) \cdot 1{,}24 + \sqrt{9}(1-0{,}94) \cdot 1{,}24 \right] = 5{,}32$ м,

т.е. по сравнению со схемой опоры из примера 3 (без учета коэффициента $K_п^*$) глубина размыва уменьши - лась более чем в 1,5 раза $\left(\frac{8{,}24}{5{,}32}\right) = 1{,}55$), что свиде - тельствует о слабом влиянии на местный размыв уширения опоры, если оно расположено вверху опоры.

Пример 5. Параметры потока и грунт примем те же, что и в примере 3. Косина потока отсутствует. Опора - массивная, из двух элементов (см. рис. 2, в): нижний элемент шириной $b_1 = 7$ м - прямоугольной формы ($K_{ф_1} = 1{,}24$), возвышающийся над дном на $e = 2$ м, верхний элемент шириной $b_2 = 5{,}1$ м - с полуциркульными торцами ($K_{ф_2} = 0{,}85$). На уровне $e = 2$ м расположена лобовая полка шириной $\Delta L_1 = 0{,}95$ м.

Значение коэффициента $K_п$ составит:

$$K_п = 0{,}75 + 0{,}25\sqrt{\frac{2}{9}} = 0{,}87.$$

Так как $\Delta L_1 = 0{,}95$ м $> \frac{b_2}{6} = \frac{5{,}1}{6} = 0{,}85$, корректиро - вать значение $K_п$ не требуется.

Приняв из предыдущего примера параметр переноса наносов $(v/v_в)^n = 0{,}81$ и $z = 0{,}68$, по формуле (5) определяем глубину местного размыва у опоры:

$h = \sqrt{9} \cdot 0{,}81 \left[\sqrt{7} \cdot 0{,}68 \cdot 1{,}24 + \sqrt{5{,}1} \cdot (1-0{,}68) \cdot 0{,}85 \right] \cdot 0{,}87 =$
$= 6{,}90 \cdot 0{,}87 = 6{,}0$ м.

Для сравнения рассчитаем глубину размыва по средней ширине опоры, которую определим по формуле (3):

$$b_{ср} = \frac{7 \cdot 2 + 5{,}1 \cdot 7}{9} = 5{,}52 \text{ м}.$$

Средний коэффициент формы опоры находим по формуле (4):

$$\overline{K}_ф = \frac{7 \cdot 2 \cdot 1{,}24 + 5{,}1 \cdot 7 \cdot 0{,}85}{7 \cdot 2 + 5{,}1 \cdot 7} = 0{,}96.$$

Глубина размыва рассчитывается по формуле (1):

$h = 1{,}1\sqrt{5{,}52 \cdot 9} \cdot 0{,}81\ 0{,}96 = 6{,}03$ м $< 6{,}90$ м,

т.е. при расчете по $b_{ср}$ мы занизили бы глубину размыва на 14%.

Пример 6. Опору шириной в нижней части $b_1 = 6$ м предполагается строить в две очереди: в первый год забивается ограждающий металлический шпунт, образующий прямоугольный контур 6x12 м, высотой над дном после общего размыва $e = 2{,}3$ м; на следующий год, после прохода паводка с ожидаемой вероятностью превышения 10%, предусматривается возведение опоры.

Требуется определить глубину местного размыва у шпунтового ограждения для назначения глубины забивки шпунта.

Глубина и скорость потока для паводка вероятностью 1:10 определены морфометрическим расчетом: $H = 6{,}7$ м, $v = 1{,}1$ м/с. Грунт русла реки на глубину 7 м представлен однородным среднезернистым песком ($d = 0{,}3$ мм).

Таким образом, расчетная схема шпунтового ограждения представляет собой затопляемую преграду (см. рис. 2, з).

Определяем по формуле (13) неразмывающую скорость

$$v_0 = 3{,}6 \cdot \sqrt[4]{6{,}7 \cdot 0{,}0003} = 0{,}76 \text{ м/с} < 1{,}1.$$

Донная и средняя взмучивающие скорости по формулам (14) и (16) составят:

$$v_{в.д} = \sqrt[3]{9{,}81 \cdot 0{,}0324 \cdot 6{,}7} = 1{,}29 \text{ м/с};$$

$$\frac{H}{d} = \frac{6{,}7}{0{,}0003} = 22333; \quad \left(\frac{H}{d}\right)^{0{,}06} = 1{,}81;$$

$$v_в = 1{,}29 \cdot 1{,}81 = 2{,}33 \text{ м/с}.$$

Степенной параметр рассчитаем по формуле (17):

$$n = 0{,}5 + 0{,}24 \cdot \frac{1{,}10}{1{,}29} = 0{,}70.$$

Находим относительную высоту преграды и коэффициент z:

$$\frac{e}{H}=\frac{2,3}{6,7}=0,34;\quad z=0,34^{0,25}=0,76.$$

Глубину местного размыва определяем по формуле (11):

$$h=1,1\sqrt{6\cdot6,7}\cdot\left(\frac{1,10}{2,33}\right)^{0,70}\cdot0,76\cdot1,24=3,87\ \text{м}.$$

Слоистое строение несвязных грунтов

Пример 7. Глубина потока $H=18$ м, скорость у опоры $v=1,8$ м/с; опора – на высоком ростверке с закругленными торцами, на круглых сваях-оболочках диаметром $a=1$ м, с шагом (в свету) $S=1$ м (см.рис.2,ж). Возвышение подошвы ростверка над дном $e_1=6,5$ м, а его обреза над дном – $e_2=10$ м. Ширина ростверка $b_1=6,6$ м. Тело опоры – овальной формы, шириной $b_2=5$ м.

Косина потока отсутствует. Русло сложено слоями однородных грунтов, для которых значения скоростей, характеризующих устойчивость наносов, приведены в табл.2 настоящего приложения.

Таблица 2

Грунт	Глубина залегания грунта, м	d, мм	w, м/с	v_0, м/с	v_{0g}, м/с	v_g, м/с
Песок среднезернистый	0–2,8	0,25	0,027	0,93	1,68	3,28
Песок крупнозернистый	2,8–5,0	1,20	0,110	1,37	2,67	4,75
Гравий	5,0–12,0	5,00	0,249	1,96	3,52	5,74

Определяем относительные высоты элементов опоры и значения коэффициентов z_1 и z_2:

$$\frac{e_1}{H}=\frac{6,5}{18}=0,36;\quad z_1=0,36^{0,25}=0,77;\quad \frac{e_2}{H}=\frac{10}{18}=0,55;$$

$$z_2=0,55^{0,25}=0,86.$$

Глубину размыва в двух верхних слоях грунта находим по формуле (9), приняв безразмерный коэффициент, характеризующий число свай $A_N=2,1$ (три сваи в ряду), и коэффициенты формы ростверка и тела опоры $K_{\Phi_1}=K_{\Phi_2}=0,85$, круглых свай-оболочек $K_{\Phi.C}=1$.

По формуле (9) определяем глубину размыва в первом верхнем слое грунта при степенном параметре $n=0,5+0,24\frac{1,8}{1,68}=0,76$:

$$h=\sqrt{18}\left(\frac{1,8}{3,28}\right)^{0,76}\left[\sqrt{6,6}(0,86-0,77)\cdot 0,85+\sqrt{5}(1-0,86)\times\right.$$

$$\left.\times 0,85+\frac{1,0\cdot 2,1}{\sqrt{1+1}}\cdot 0,77\cdot 1,0\right]=4,24\cdot 0,63\cdot 1,62=4,32\text{ м}.$$

Поскольку 4,32 м>2,8 м, обнажается второй слой грунта.

Находим глубину размыва во втором слое при степенном параметре $n=0,5+0,24\frac{1,8}{2,67}=0,66$:

$$h=\sqrt{18}\left(\frac{1,8}{4,75}\right)^{0,66}\cdot 1,62=4,24\cdot 0,53\cdot 1,62=3,64\text{ м},$$

т.е. размыв прекратится в крупнозернистом песке. Расчетную глубину размыва следует принимать равной 3,64 м.

Разнородные несвязные грунты

Пример 8. Глубина потока $H=10,1$ м, скорость у опоры $V=1,56$ м/с. Опора массивная: ее нижняя часть шириной $b_1=6,6$ м выступает над дном на $e=3$ м; верхняя часть шириной $b_2=6$ м. Обе части опоры овальной формы.

Косина потока отсутствует. Русло сложено средне-зернистым и крупным песком с гравием, гранулометрический состав которого приведен в табл.3 настоящего приложения.

Средний диаметр частиц наносов $d=2,09$ мм.

Таблица 3

Фракция крупного песка с гравием, мм	Средний диаметр фракций наносов d_i, мм	Массовая доля фракции P_i, %	$P_i d_i$
10–5	7,500	15,0	112,50
5–2	3,500	16,6	58,10
2–1	1,500	12,1	18,20
1–0,5	0,750	7,5	5,60
0,5–0,25	0,375	29,4	11,00
0,25–0,1	0,175	19,1	3,30
0,1–0,05	0,075	0,3	0,02

$\Sigma P_i d_i = 208,7$

По графику гранулометрического состава (рис.3 настоящего приложения) находим, что $d_{85} = 3,5$ мм.

Поскольку $\frac{d_{85}}{d} = \frac{3,5}{2,09} = 1,67 > 1,20$,

грунт неоднородный. Расчет следует вести на диаметр частиц d_{85}, которые создадут отмостку воронки размыва. Однако неразмывающую скорость v_0, которая характеризует устойчивость наносов за пределами резко деформированного потока у опоры, определяем по среднему диаметру d:

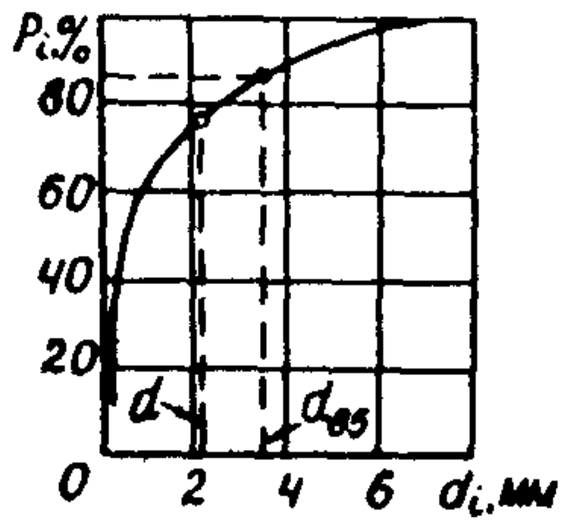

Рис.3. График гранулометрического состава среднего и крупного песка с гравием

$$v_0 = 3,6\sqrt[4]{10,1 \cdot 0,00209} = 1,37 \text{ м/с} < 1,56 \text{ м/с}.$$

Донная и средняя взмучивающие скорости перед опорой по формулам (14) и (16) при $d_{85} = 3,5$ мм и $\omega = 0,211$ м/с (см.табл.2) составит:

$$v_{в.д} = \sqrt[3]{9,81 \cdot 0,211 \cdot 10,1} = 2,75 \text{ м/с};$$

$$\frac{H}{d} = \frac{10,1}{0,0035} = 2866; \quad \left(\frac{H}{d}\right)^{0,06} = 1,60;$$

$v_в$=2,75·1,60=4,40 м/с.

Степенной параметр n =0,5+0,24 $\frac{1,56}{2,75}$ =0,64.

Так как e =3 м< $\frac{H}{3}$ и $в_1/в_2$ =6,6/6=1,1, расчет глубины размыва производим по формуле (1):

$$в_{ср} = \frac{6,6\cdot3+6\cdot7,1}{10,1} = 6,18 \text{ м};$$

$$h = 1,1\sqrt{6,18\cdot10,1}\cdot(1,56/4,40)^{0,64}\cdot0,85 = 3,76 \text{ м}.$$

Заметим, что при принятых параметрах потока и опоры, но разных коэффициентах формы частей опоры ($K_{ф_1}/K_{ф_2}$ =1,1÷1,2) расчет по $в_{ср}$ и по формуле для переменного сечения дает одинаковую глубину размыва.

Если бы расчет производился без учета самоотмостки русла по среднему диаметру частиц песчаных наносов d =2,09 мм, глубина местного размыва составила бы:

$$v_{вg} = \sqrt[3]{9,81\cdot0,157\cdot10,1} = 2,49 \text{ м/с}; \quad \frac{H}{d} = \frac{10,1}{0,00209} = 4833;$$

$$\left(\frac{H}{d}\right)^{0,06} = 1,66; \quad v_в = 2,49\cdot1,66 = 4,13 \text{ м/с};$$

$$n = 0,5+0,24\frac{1,56}{2,49} = 0,65;$$

$$h = 1,1\sqrt{6,18\cdot10,1}\cdot\left(\frac{1,56}{4,13}\right)^{0,65}\cdot0,85 = 3,91 \text{ м}.$$

Пример 9. Глубина потока H =10 м, скорость у опоры v =1,2 м/с; опора - овальной формы, на высоком прямоугольном ростверке, на круглых сваях-оболочках диаметром a =0,8 м, с шагом (в свету) S =1 м (см.рис. 2, ж). Возвышение подошвы ростверка над дном e_1=2,4 м, а его обреза над дном - e_2 =5 м. Ширина ростверка $в_1$ =5,4 м, тела опоры - $в_2$ =4 м.

Косина потока отсутствует. Русло сложено на глубину более 7 м неоднородным песком. Расчетный диаметр частиц грунта, определенный по гранулометрическому графику, составляет d_{85} =0,8 мм.

Неразмывающая скорость

$$v_0 = 3{,}6\sqrt[4]{10 \cdot 0{,}0008} = 1{,}08 \text{ м/с} < 1{,}2 \text{ м/с}.$$

Донную и среднюю взмучивающие скорости определяем по формулам (14) и (16), приняв гидравлическую крупность по табл. 2 равной $w = 0{,}0807$ м/с:

$$v_{в.д} = \sqrt[3]{9{,}81 \cdot 0{,}0807 \cdot 10} = 1{,}99 \text{ м/с};$$

$$\frac{H}{d} = \frac{10}{0{,}0008} = 12500; \quad \left(\frac{H}{d}\right)^{0{,}06} = 1{,}75;$$

$$v_в = 1{,}99 \cdot 1{,}75 = 3{,}48 \text{ м/с}.$$

Степенной параметр по формуле (17) $n = 0{,}5 + 0{,}24\frac{1{,}2}{1{,}99} = 0{,}64$.

Относительные высоты элементов опоры и значения коэффициентов z составят:

$$\frac{h_1}{H} = \frac{2{,}4}{10} = 0{,}24; \; z_1 = 0{,}24^{0{,}25} = 0{,}70; \; \frac{h_2}{H} = \frac{5}{10} = 0{,}5;$$

$$z_2 = 0{,}5^{0{,}25} = 0{,}84.$$

Глубину местного размыва определяем по формуле (9), приняв безразмерный коэффициент $A_N = 2{,}1$ (три сваи в ряду):

$$h = \sqrt{10} \cdot \left(\frac{1{,}2}{3{,}48}\right)^{0{,}64} \cdot \left[\sqrt{5{,}4}(0{,}84 - 0{,}70) \cdot 1{,}24 + \sqrt{4}(1 - 0{,}84) \times \right.$$

$$\left. \times 0{,}85 + \frac{0{,}8 \cdot 2{,}1}{\sqrt{1 + 0{,}8^2}} \cdot 0{,}70 \cdot 1{,}0\right] = 2{,}45 \text{ м}.$$

Пример 10. Глубина потока $H = 9{,}34$ м, скорость у опоры $v = 1{,}00$ м/с. Опора – из круглых свай-оболочек больших диаметров, образующих в поперечном направлении два столба, объединенных плитой ростверка (рис. 4 настоящего приложения).

Поток набегает на опору под углом $\alpha = 20^\circ$. Русло реки у опоры сложено неоднородным песком с расчетным диаметром частиц наносов по гранулометрическому графику $d_{85} = 0{,}60$ мм.

Неразмывающая скорость

$$v_0 = 3{,}6 \cdot \sqrt[4]{9{,}34 \cdot 0{,}0006} = 0{,}98 \text{ м/с} < 1{,}00 \text{ м/с}.$$

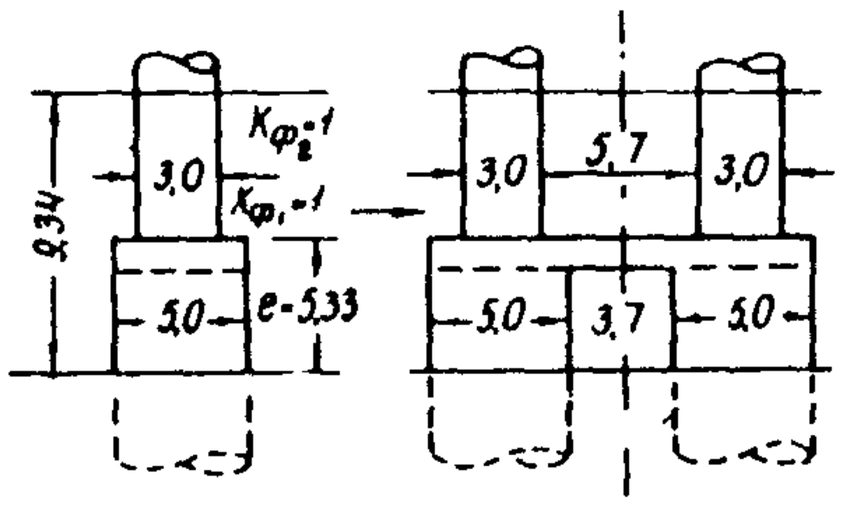

Рис.4. Схема двухстолбчатой опоры

Донная и средняя взмучивающие скорости при гидравлической крупности $\omega = 0{,}0648$ м/с (см.табл.2) составляют:

$$v_{вg} = \sqrt[3]{9{,}81 \cdot 0{,}0648 \cdot 9{,}34} = 1{,}81 \text{ м/с};$$

$$\frac{H}{d} = \frac{9{,}34}{0{,}0006} = 15567; \quad \left(\frac{H}{d}\right)^{0{,}06} = 1{,}78;$$

$$v_в = 1{,}81 \cdot 1{,}78 = 3{,}22 \text{ м/с}.$$

Степенной параметр находим по формуле (17):

$$n = 0{,}5 + 0{,}24 \frac{1{,}00}{1{,}81} = 0{,}63.$$

Определяем относительную высоту нижней части опоры и значение коэффициента z (см.рис.4):

$$\frac{e}{H} = \frac{5{,}33}{9{,}34} = 0{,}57; \quad z = 0{,}57^{0{,}25} = 0{,}87.$$

Глубину местного размыва для этого типа опоры рассчитываем как для массивной круглой опоры из двух элементов по формуле (5), но при определении коэффициента косины K_α следует учесть особенность обтекания двух близко расположенных столбов-оболочек. С этой целью воспользуемся опытными данными И.В.Дитца /7/, по которым построен график рис.5 данного приложения для двух случаев: для раздельных свай (кривые 1-3, $h/a \cong K_\alpha$) и спаренных свай (кривая 4, $h/a \cong K_\varphi K_\alpha$).

Из графика рис.5 для нижней части опоры имеем:
$\frac{S_1}{a_1} = \frac{3,7}{5,0} = 0,74$.

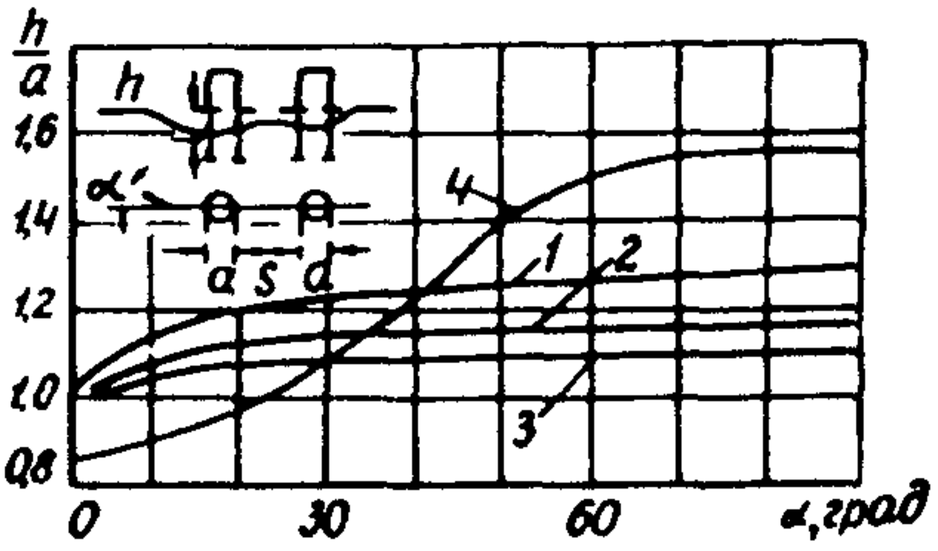

Рис.5. Изменение относительной глубины размыва h/a в зависимости от косины потока для свай-оболочек: 1 – S/a = =0,5÷1,0; 2 – S/a =2,0; 3 – S/a =3,0; 4 – S =0

По кривой 1 для $\alpha = 20^{\circ}$ получаем $K_{\alpha_1} = 1,2$.

Для верхней части опоры при $\frac{S_2}{a_2} = \frac{5,7}{3,0} = 1,9$, интерполируя между кривыми 1 и 2, получаем $K_{\alpha_2} = 1,13$.

Приняв коэффициент формы элементов опоры $K_{\Phi_1} = K_{\Phi_2} = 1$, по формуле (5) определяем глубину местного размыва:

$$h = \sqrt{9,34}\left(\frac{1,00}{3,22}\right)^{0,63}\left[\sqrt{5}\cdot 0,87\cdot 1,2 + \sqrt{3}\,(1-0,87)\cdot 1\cdot 1,13\right] = 3,80 \text{ м}.$$

Пример 11. Исходные данные те же, что в примере 1, но русло сложено мягкопластичным суглинком с показателем консистенции $J_L = 0,6$ и коэффициентом пористости $e_n = 0,75$. Поток влечет песчаные наносы со средним диаметром частиц $d = 0,15$ мм.

Согласно данным инженерно-геологических исследований расчетное значение удельного сцепления в грунте $C_p = 1,95\cdot 10^4$ Па.

По рис.6, учитывая, что поток влечет песчаные наносы ($\xi = 1,4$), определяем неразмывающую скорость $v_{o.cв} = 1,65$ м/с.

Взмучивающие скорости перед опорой находим по формулам (22) и (23):

$$v_{в.g.св}=1,4\cdot5,0^{0,08}\cdot1,65=2,63 \text{ м/с};$$

$$v_{в.св}=2,0\cdot5,0^{0,14}\cdot1,65=4,13 \text{ м/с}.$$

Степенной параметр по формуле (17) составит:

$$n=0,5+0,24\cdot\frac{0,63}{2,63}=0,56.$$

Тогда глубина местного размыва по формуле (1):

$$h=1,1\sqrt{4,3\cdot5,0}\cdot\left(\frac{0,63}{4,13}\right)^{0,56}\cdot0,85=1,52 \text{ м}.$$

Полученную глубину размыва необходимо сравнить с глубиной воронки, которая могла бы образоваться в слое донных наносов. Из примера 1 видно, что эта глубина составила 2,21 м, что больше глубины воронки в связном грунте. Согласно указаниям п.3.5,а за расчетную принимаем глубину $h=1,52$ м в связном грунте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев О.В. Проектирование мостовых переходов. М.: Транспорт, 1980.

2. Журавлев М.М. Местный размыв у опор мостов. М.: Транспорт, 1984.

3. Журавлев М.М. Расчет местного размыва у опор сложной формы. – Автомобильные дороги, 1985, № 4.

4. Кнороз В.С. Неразмывающие (предельные) скорости разнозернистых по крупности материалов. – Изв.ВНИИГ, т.71, 1962.

5. Пичугов Г.С. Влияние формы фундамента мостовых опор на местный размыв. – Труды Гипродорнии, вып.31. М.,1980.

6. Ярославцев И.А. Расчет местного размыва у мостовых опор. ЦНИИС. Сообщение № 80. М., 1956.

7. Dietz J.W. Kolkbieldung an einem kreiszilindrischen Pfeilerpaar.Die Bautechnik, 1973,N6

Основные буквенные обозначения

b – ширина опоры или ее элемента

C_p – расчетное удельное сцепление в связном грунте

d – средний диаметр частиц наносов

d_{85} – диаметр частиц наносов, меньше которого в пробе содержится 85% частиц по массе

e – высота уступа опоры или подошвы ростверка над дном; высота затопляемой преграды

g – ускорение силы тяжести

h – расчетная глубина местного размыва

H – средняя глубина потока у опоры

α – угол между направлением потока и осью опоры (угол косины); при соосности опоры с потоком $\alpha = 0$

K_φ, K_α – коэффициенты соответственно формы и косины потока

L – длина опоры

a – диаметр или ширина свай

S – расстояние между сваями в свету

V – скорость потока у опоры

$V_0, V_{0.св}$ – неразмывающая скорость соответственно несвязного и связного грунтов

$V_{в.д}, V_в$ – соответственно донная и средняя взмучивающие скорости у споры для несвязных грунтов русла

$V_{в.д.св}, V_{в.св}$ – то же, для связных грунтов русла

W – гидравлическая крупность частиц наносов (скорость их падения в стоячей воде)