

Расчет неразмывающих скоростей на высоте выступов шероховатости донных отложений

М.М. Кадацкая^{1a}, А.Ю. Виноградов^{1,2b}, В.А. Обязов^{1c}, В.А. Кацадзе^{2d}, С.А. Угрюмов^{2e}, Ю.И. Беленький^{2f}, А.Р. Бирман^{2g}, С.В. Хвалев^{1h}, А.В. Кучмин¹ⁱ, И.В. Бачериков^{2j}, Т.В. Коваленко^{2k}

¹ ООО НПО «Гидротехпроект», ул. Октябрьская, 55а, Валдай, Россия

² Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

^a mk@npogtp.ru, ^b gd@npogtp.ru, ^c td@npogtp.ru, ^d tlzp@inbox.ru, ^e ugr-s@yandex.ru, ^f tp_mlk@spbftu.ru,

^g birman1947@mail.ru, ^h sh@npogtp.ru, ⁱ ak@npogtp.ru, ^j ivashka512@gmail.com, ^k taras.kovalenko.spb@gmail.com

^a <https://orcid.org/0000-0002-5979-0970>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-8838-8676>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-9644-1286>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-2997-4947>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-4170-3664>, ^g <https://orcid.org/0000-0002-1693-0515>, ^h <https://orcid.org/0000-0002-5324-2498>, ⁱ <https://orcid.org/0000-0003-2111-6347>, ^j <https://orcid.org/0000-0002-0531-1604>, ^k <https://orcid.org/0000-0003-1366-3332>

Статья поступила 02.09.2019, принята 20.09.2019

Правильный расчет русловых деформаций при проектировании подмостных укреплений на участках отверстий водопропускных сооружений является основным условием их долговременной и безотказной эксплуатации. Основным критерием устойчивости проектируемого водопропускного инженерного сооружения лесных дорог является условие не превышения допустимой в проекте крепления русла неразмывающей скорости. В статье рассматриваются различные подходы к расчету неразмывающих скоростей потока на высоте выступов шероховатости. В качестве примера приведены расчеты размыва донных отложений однородных песков средней крупности 1 мм в предположении воздействия плоского равномерного потока на дно при турбулентном режиме течения. Проведен анализ различных формул неразмывающих придонных скоростей — как предлагаемых в специальной литературе, так и разработанных авторами самостоятельно на основе анализа физики процесса. В итоге сформулированы следующие выводы: рассмотренные в статье зависимости позволяют достаточно легко оценить реальные неразмывающие придонные скорости; отклонение значений придонных неразмывающих скоростей по рассмотренным в статье зависимостям от средних не превышает 20 %.

Ключевые слова: водопропускные сооружения; неразмывающая скорость; турбулентный режим движения жидкости; придонная скорость на уровне вершин выступов шероховатостей.

Calculation of non-eroding velocities at the height of surface asperity of bottom sediment

М.М. Kadatskaya^{1a}, А.Ю. Vinogradov^{1,2b}, В.А. Obyazov^{1c}, В.А. Katsadze^{2d}, S.A. Ugryumov^{2e}, Yu.I. Belenkiy^{2f}, A.R. Birman^{2g}, S.V. Hvalev^{1h}, A.V. Kuchmin¹ⁱ, I.V. Bacherikov^{2j}, T.V. Kovalenko^{2k}

¹ SPA «Hydrotechproject», LLC; 55a, Oktyabr'skaya St., Valdai, Russia

² St. Petersburg State Forest Technical University under name of S.M. Kirov; 5, Institut'sky Per., St. Petersburg, Russia

^a mk@npogtp.ru, ^b gd@npogtp.ru, ^c td@npogtp.ru, ^d tlzp@inbox.ru, ^e ugr-s@yandex.ru, ^f tp_mlk@spbftu.ru,

^g birman1947@mail.ru, ^h sh@npogtp.ru, ⁱ ak@npogtp.ru, ^j ivashka512@gmail.com, ^k taras.kovalenko.spb@gmail.com

^a <https://orcid.org/0000-0002-5979-0970>, ^b <https://orcid.org/0000-0001-8838-8676>, ^c <https://orcid.org/0000-0002-9644-1286>, ^d <https://orcid.org/0000-0002-2997-4947>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-8077-3542>, ^f <https://orcid.org/0000-0002-4170-3664>, ^g <https://orcid.org/0000-0002-1693-0515>, ^h <https://orcid.org/0000-0002-5324-2498>, ⁱ <https://orcid.org/0000-0003-2111-6347>, ^j <https://orcid.org/0000-0002-0531-1604>, ^k <https://orcid.org/0000-0003-1366-3332>

Received 02.09.2019, accepted 20.09.2019

The correct calculation of channel deformations while the designing fortifications under the bridge in the sections of the openings of culverts is the main condition for their long-term and trouble-free operation. The main criterion for the stability of the designed culvert engineering construction of forest roads is the condition for not exceeding the non-eroding velocity allowed for this channel. The article discusses various approaches for calculating non-eroding flow velocities at the height of surface asperity. As an example, calculations of erosion of bottom sediments of homogeneous sand of medium size 1 mm under the assumption of the effect of a flat uniform flow on the bottom under turbulent flow conditions are given. The analysis of various formulas of non-erosion bottom velocities is carried out - both those proposed in the specialized literature, and independently developed by the authors based on an analysis of the process phys-

ics. As a result, the following conclusions are formulated: the dependences considered in the article make it fairly easy to estimate the real non-erosion bottom velocities; the deviation of the values of the bottom non-erosion velocities according to the dependences considered in the article on average does not exceed 20 %.

Keywords: culverts; non-eroding velocity; turbulent fluid motion; bottom velocity at the height of surface asperity.

Введение. Анализ причин разрушения подавляющего количества построенных мостовых и трубных переходов лесных дорог позволяет выделить две основные:

- недооценка величины максимального пропускаемого расхода;
- ошибка в оценке неразмывающих скоростей.

Рассмотрение физического подхода при расчетах неразмывающих скоростей при воздействии потока на дно проектируемого водоотводного или водопропускного сооружения в предлагаемой статье получило дальнейшее развитие [1].

Методика исследования. Далее в данной статье рассматривается размыв донных отложений однородных песков средней крупности 1 мм из предположений воздействия плоского равномерного потока на дно при турбулентном режиме и используются следующие обозначения (табл. 1).

Таблица 1. Принятые обозначения

V_{npd} — осредненная продольная придонная скорость на глубине y , м/с. За придонную скорость принимаем скорость потока на уровне вершин выступов шероховатости ($y = \Delta$);
V_{cp} — средняя скорость потока, м/с;
V_* — динамическая скорость, м/с;
y — ордината по оси, перпендикулярной поверхности дна потока, м;
Δ — высота выступов шероховатости, м;
h — глубина потока, м;
R — гидравлический радиус, м, $R \approx h$;
Re_* — число Рейнольдса на высоте выступов шероховатости;
τ — касательное напряжение, $\frac{кг}{м \cdot с^2}$;
ρ — плотность жидкости, $1000 \frac{кг}{м^3}$;
g — ускорение свободного падения, $9,81 \frac{м}{с^2}$;
i — гидравлический уклон: $i = \frac{V^2}{C^2 h}$;
χ — постоянная Кармана, принятая равной 0,27;
l — величина, характеризующая геометрическую структуру турбулентности потока, масштаб турбулентности, м;
C — коэффициент Шези, определяемый по формуле Н.Н. Павловского: $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$, где R — гидравлический радиус, $R \approx h$;
n — коэффициент шероховатости;
A — коэффициент турбулентной вязкости (турбулентного обмена), $кг/м \cdot с$

Предположим, что толщина пограничного слоя меньше высоты выступов шероховатости и на донные отложения оказывает воздействие турбулентный режим. Попробуем оценить размывающую скорость на уровне вершин выступов шероховатости различными способами.

1. Оценочное значение осредненной скорости на уровне вершин выступов шероховатости [2] приведено в табл. 2.

$$V_{npd} = k_1 \cdot V_* \quad (1)$$

Значение коэффициента k_1 находится в пределах $6,5 \div 9,75$. Нижняя граница определена по опытам Ванони; Никурадзе и Зегжда определили $k_1 = 8,5$ [2], верхняя определена путем пересчета высоты выступов шероховатости, принятых в опыте Ванони с учетом замечаний Гришанина [2].

2. Распределение скоростей по глубине потока с использованием зависимости В.Н. Гончарова [3] при изменяющейся, в зависимости от скорости потока, толщине пограничного слоя [2] привело к уточненным результатам скорости потока на границе слоя (табл. 2):

$$V_{npd} = V_{cp} \frac{\lg(16,7 \cdot y / \Delta + 1)}{\lg 6,15 \cdot h / \Delta} \quad (2)$$

Таблица 2. Размывающая скорость на высоте выступов шероховатости по различным подходам

V_{cp} , м/с	0,1	0,5	1	2
V_* , м/с	0,004	0,019	0,038	0,077
V_{npd} , (1) $k=7,0$, м/с	0,028	0,133	0,266	0,539
V_{npd} , (2) м/с	0,027	0,134	0,268	0,535

3. Пусть мы имеем дело с равномерным установившимся движением, гидравлический радиус равен глубине: $R = h$, сопротивление движению оказывает дно потока. Поскольку число $Re_* \geq 45$, то:

$$\tau = \rho \cdot V_*^2 \Rightarrow \tau = \rho \cdot g \cdot h \cdot i \quad (3)$$

С другой стороны, величина градиента осредненной скорости определяется величиной касательного напряжения в потоке:

$$\tau = \rho \cdot l^2 \cdot \left(\frac{dV}{dy} \right)^2 \quad (4)$$

Применяя формулу Прандтля [2]:

$$l = \chi \cdot y \quad (5)$$

$$(\chi y)^2 \cdot \left(\frac{dV}{dy} \right)^2 = g \cdot h \cdot i = g \cdot \left(\frac{V}{C} \right)^2 \quad (6)$$

$$(\chi y)^2 \cdot \left(\frac{dV}{dy} \right)^2 = g \cdot \left(\frac{V}{C} \right)^2 \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{n} \cdot h^{1/6}, \quad (8)$$

$$\frac{dV}{dy} = \frac{n \cdot V \cdot \sqrt{g}}{h^{1/6} \cdot \chi \cdot y}, \quad (9)$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{n \cdot \sqrt{g} \cdot dy}{h^{1/6} \cdot \chi \cdot y}, \quad (10)$$

$$\int \frac{dV}{V} = \int \frac{n \cdot \sqrt{g}}{h^{1/6} \cdot \chi \cdot y} dy, \quad (11)$$

$$\ln|V| = \frac{n \cdot \sqrt{g}}{h^{1/6} \cdot \chi} \ln|y| + \ln|C_1|. \quad (12)$$

Для нахождения постоянной интегрирования C_1 воспользуемся следующим граничным условием:

$$V(y = 0,4h) = V_{cp}, \quad (13)$$

$$\ln|V_{cp}| = \frac{n \cdot \sqrt{g}}{h^{1/6} \cdot \chi} \ln|0,4h| + \ln|C_1|, \quad (14)$$

$$\ln|C_1| = \ln|V_{cp}| - \frac{n \cdot \sqrt{g}}{h^{1/6} \cdot \chi} \ln|0,4h| = \ln \left| \frac{V_{cp}}{(0,4h)^{\frac{n \cdot \sqrt{g}}{h^{1/6} \cdot \chi}}} \right|, \quad (15)$$

$$C_1 = \frac{V_{cp}}{(0,4h)^{\frac{n \cdot \sqrt{g}}{h^{1/6} \cdot \chi}}}. \quad (16)$$

Тогда окончательно получаем, что:

$$\ln|V| = \frac{n \cdot \sqrt{g}}{h^{1/6} \cdot \chi} \ln|y| + \ln \left| \frac{V_{cp}}{(0,4h)^{\frac{n \cdot \sqrt{g}}{h^{1/6} \cdot \chi}}} \right|, \quad (17)$$

$$V = \frac{V_{cp}}{(0,4h)^{\frac{n \cdot \sqrt{g}}{h^{1/6} \cdot \chi}}} y^{\frac{n \cdot \sqrt{g}}{h^{1/6} \cdot \chi}} = V_{cp} \left(\frac{y}{0,4h} \right)^{\frac{n \cdot \sqrt{g}}{h^{1/6} \cdot \chi}}. \quad (18)$$

Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Таблица 3. Придонная скорость по зависимости (18)

V_{cp} , м/с	0,1	0,5	1	2
$V_{np\delta}$ (18), м/с	0,032	0,160	0,321	0,642

4. Используя прием замены максимальной скорости на вертикали средней скоростью [1] в соотношении распределения дефицита скорости $\frac{V_{max} - V}{V_*} = 51g \frac{h}{y}$ и [2], получаем следующую зависимость для придонной скорости на высоте выступов шероховатости:

$$V_{np\delta} = V_{cp} - 5V_* \lg \frac{h}{y}. \quad (19)$$

Таблица 4. Придонная скорость по зависимости (19)

V_{cp} , м/с	0,1	0,5	1	2
$V_{np\delta}$ (19), м/с	0,022	0,132	0,264	0,508

5. Для плоского потока при постоянном касательном напряжении:

$$\frac{A}{\rho} = \nu_T = \chi V_* y. \quad (20)$$

Полное напряжение сопротивления движению плоского потока складывается из касательного на дне и турбулентного в теле потока [3]:

$$\tau_{полн} = \mu \frac{dV_{np\delta}}{dy} + A \frac{dV_{np\delta}}{dy} = (\mu + A) \frac{dV_{np\delta}}{dy}. \quad (21)$$

На высоте выступов шероховатости при учете только турбулентной составляющей справедливо выражение:

$$\tau = A \frac{dV}{dy}, \quad (22)$$

$$\tau = \rho \cdot V_*^2 \Rightarrow \tau = \rho g (h - y) i = \rho g h \left(1 - \frac{y}{h} \right) i, \quad (23)$$

$$\rho g h \left(1 - \frac{y}{h} \right) i = A \frac{dV}{dy}, \quad (24)$$

$$A = \rho \chi V_* y = \rho \chi y \sqrt{gh i}, \quad (25)$$

$$\sqrt{gh i} \left(1 - \frac{y}{h} \right) = \chi y \frac{dV}{dy}, \quad (26)$$

$$dV = \frac{V_*}{\chi} \left(\frac{1}{y} - \frac{1}{h} \right) dy, \quad (27)$$

$$V_* = k_2 V, \quad (28)$$

$$\frac{dV}{k_2 V} = \frac{1}{\chi} \left(\frac{1}{y} - \frac{1}{h} \right) dy. \quad (29)$$

Граничное условие $V(y = 0,4h) = V_{cp}$:

$$V = C_1 y^{k_2/\chi} \exp \left(- \frac{k_2 y}{\chi h} \right), \quad (30)$$

$$C_1 = V_{cp} (0,4h)^{-k_2/\chi} \exp (0,4k_2/\chi), \quad (31)$$

$$V = V_{cp} \left(\frac{y}{0,4h} \right)^{\frac{k_2}{\chi}} \exp \left(\frac{k_2}{\chi} \left(0,4 - \frac{y}{h} \right) \right). \quad (32)$$

Таблица 5. Придонная скорость по зависимости (32) $k_2 = 0,039$

V_{cp} , м/с	0,1	0,5	1,0		2,0
$V_{np\delta}$ (32), м/с	0,034	0,169	0,338		0,676

6. Следующий вариант расчета придонной скорости на высоте выступов шероховатости.

Исходя из:

$$\tau_{полн} = (\mu + A) \frac{dV}{dy}, \quad (33)$$

$$\tau_{полн} = (\mu + k_3 V) \frac{dV}{dy}, \quad (34)$$

$$\tau_{полн} dy = (\mu + k_3 V) dV, \quad (35)$$

$$\tau_{полн} y = (\mu + k_3 V^2 / 2) + C_1 \quad (36)$$

и граничных условий $V_{np\delta}(y=0) = 0$:

$$C_1 = -\mu \quad (37)$$

получаем величину придонной скорости на границе выступов шероховатости с учетом турбулентной вязкости:

$$V_{npd} = \sqrt{\frac{2\tau_{полн}y}{k_3}} \quad (38)$$

Результаты расчетов приведены в табл. 6, результаты расчетов по всем рассмотренным формулам — в табл. 7. Помимо расчетных значений в табл. 7 приведены средние придонные скорости по формулам (1), (2), (18), (19), (32), (38) для каждой средней скорости

Таблица 7. Сводная таблица результатов расчетов придонных неразрывающих скоростей на высоте выступов шероховатости

$V_{cp}, м/с$	0,1	0,5	1,0	2,0	Среднее значение отклонений, %
$y = \Delta, м$	0,00067	0,00067	0,00067	0,00067	–
$V_{npd} (1), м/с$	0,028	0,133	0,266	0,539	–
Отклонение от среднего, %	6,7	11,9	11,6	10,2	10,1
$V_{npd} (2), м/с$	0,027	0,134	0,268	0,535	–
Отклонение от среднего, %	10,0	11,3	11,0	10,8	10,8
$V_{npd} (3), м/с$	0,032	0,160	0,321	0,642	–
Отклонение от среднего, %	6,7	6,0	6,6	7,0	6,6
$V_{npd} (4), м/с$	0,022	0,132	0,264	0,508	–
Отклонение от среднего, %	26,7	12,6	12,3	15,3	16,7
$V_{npd} (5), м/с$	0,034	0,169	0,338	0,676	–
Отклонение от среднего, %	13,3	11,9	12,3	12,7	12,6
$V_{npd} (6), м/с$	0,035	0,175	0,350	0,701	–
Отклонение от среднего, %	16,7	15,9	16,3	16,8	16,4
V_{npd} , среднее по (1), (2), (18), (19), (32), (39), м/с	0,030	0,151	0,301	0,600	–

Выводы.

1. Неразмывающая придонная скорость по таблицам и номограммам руководящих документов [4–12]: 0,12–0,2; по расчетам [13; 14] 0,17–0,24. Наши результаты показывают, что при средней скорости потока 0,5 м/с неразмывающая придонная скорость составляет в среднем 0,15 м/с, разброс от 0,132 до 0,175. Следовательно, рассмотренные в статье зависимости адекватны и позволяют оценить реальные неразмывающие придонные скорости.

2. Средняя по вертикали неразмывающая скорость на основании анализа полученных по различным зави-

симостям расчетных придонных значений скорости [4; 5; 12] для приведенных условий лежит в диапазоне 0,5–0,9 м/с, что соответствует табличным значениям [6–11].

Таблица 6. Придонная скорость по зависимости (38) $k_3 = 0,0071$

$V_{cp}, м/с$	0,1	0,5	1	2
$A, кг/м^3с$	0,001	0,004	0,007	0,014
$V_{npd} (39), м/с$	0,035	0,175	0,350	0,701

симостям расчетных придонных значений скорости [4; 5; 12] для приведенных условий лежит в диапазоне 0,5–0,9 м/с, что соответствует табличным значениям [6–11].

3. Отклонение значений придонных неразмывающих скоростей по рассмотренным в статье зависимостям от средних не превышает 16,7 % и лишь по формуле (19) для малых средних скоростей потока отклонение от среднего составило 26,7 %. Наиболее полно характеризует усредненные значения придонных неразмывающих скоростей формула (18) — отклонение от средних не превышает 7 %.

Литература

- Расчет неразмывающих скоростей на высоте верхней границы пограничного слоя / Виноградов А.Ю., Кадацкая М.М., Бирман А.Р., Виноградова Т.А., Обязов В.А., Кацадзе В.А., Угрюмов С.А., Бачериков И.В., Коваленко Т.В., Хвалев С.В., Парфенов Е.А. // Resources and Technology. 2019. № 3 (16). P. 44–61. DOI: 10.15393/j2.art.2019.4782
- Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. 428 с.
- Барышников Н.Б., Попов И.В. Динамика русловых потоков и русловые процессы. Л.: Гидрометеоиздат, 1988. 454 с.

- ВТР-П-25-80. Руководство по определению допускаемых неразмывающих скоростей водного потока для различных грунтов при расчете каналов. М., 1981.
- СО 34.21.204-2005. Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов. СПб.: ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2006. 104 с.
- Островидов А.М., Кузнецов И.А. Таблицы для проектирования мостов. М.: Автотрансиздат, 1959. 536 с.
- Мосты и трубы по изысканиям и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки (ПМП-91): пособие к СНиП 2.05.03-84.М., 1992. 172 с.

8. Пособие по гидравлическим расчетам малых водопропускных сооружений / под общ. ред. Г.Я. Волченкова. М.: Транспорт, 1992. 409 с.
9. Справочник по гидротехнике / Водгео. М.: Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1955. 858 с.
10. Методические рекомендации по расчету местного размыва у опор мостов, 2-е изд. М.: Союздорнии, 1988. 39 с.
11. СП 32-102-95. Сооружение мостовых переходов и подтопляемых насыпей. Методы расчета местных размывов. М.: Трансстрой, 1996. 79 с.
12. Пуркин В.И., Холин А.С. Проектирование мостовых переходов. М.: МАДИ, 2014. 44 с.
13. Штеренлихт Д.В. Гидравлика: в 2 кн. М.: Энергоатомиздат, 1991. Кн. 2. 367 с.
14. Юфин А.П. Гидромеханизация. М.: Стройиздат, 1974. 223 с.
4. VTR-P-25-80. Guidance on the determination of permissible non-eroding water flow velocity for various soils when calculating canals. M., 1981.
5. SO 34.21.204-2005. Recommendations for predicting the transformation of the channel in the downstream of hydroelectric facilities. SPb.: OAO «VNIIG im. B.E. Vedeneeva», 2006. 104 p.
6. Ostrovidov A.M., Kuznecov I.A. Tables for the design of bridges. M.: Avtotransizdat, 1959. 536 p.
7. Bridges and pipes for surveying and designing railway and road bridge crossings through waterways (PMP-91): posobie k SNiP 2.05.03-84.M., 1992. 172 p.
8. Manual for hydraulic calculations of small culverts, under total / pod obshch. red. G.YA. Volchenkova. M.: Transport, 1992. 409 p.
9. Handbook of hydraulic engineering / Vodgeo. M.: Gos. izd-vo lit. po stroitel'stvu i arhitekture, 1955. 858 p.
10. Guidelines for the calculation of local erosion at bridge supports, 2-e izd. M.: Soyuzdornii, 1988. 39 p.
11. SP 32-102-95. Constructions of bridge crossings and flooded embankments. Methods for calculating local washouts. M.: Transstroj, 1996. 79 p.
12. Purkin V.I., Holin A.S. Design of bridge crossings. Tutorial. M.: MADI, 2014. 44 p.
13. SHterenliht D.V. Hydraulics: v 2 kn. M.: Energoatomizdat, 1991. Kn. 2. 367 p.
14. YUfin A.P. Hydromechanization. M.: Strojizdat, 1974. 223 p.

References

1. Calculation of non-eroding water flow velocities at the height of the upper boundary layer / Vinogradov A.YU., Kadackaya M.M., Birman A.R., Vinogradova T.A., Obyazov V.A., Kadadze V.A., Ugryumov S.A., Bacherikov I.V., Kovalenko T.V., Hvalev S.V., Parfenov E.A. // Resources and Technology. 2019. № 3 (16). P. 44–61. DOI: 10.15393/j2.art. 2019. 4782.
2. Grishanin K.V. The dynamics of channel flows. L.: Gidrometeoizdat, 1969. 428 p.
3. Baryshnikov N.B., Popov I.V. The dynamics of channel flows and channel processes. L.: Gidrometeoizdat, 1988. 454 p.