

НАУЧНЫЕ ДИСКУССИИ SCIENTIFIC DISCUSSIONS

УДК 556.536

DOI: 10.34753/HS.2020.2.1.82

НЕРАЗМЫВАЮЩИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА ДЛЯ НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

А.Ю. Виноградов^{1,2}, В.А. Обызов¹,
Т.А. Виноградова^{1,3}, М.М. Кадацкая¹

¹ООО Научно-производственное объединение
"Гидротехпроект", г. Валдай, Россия;

²Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия; ³Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
gd@npogtp.ru

NON-ERODING WATER VELOCITIES FOR INCOHERENT BOTTOM SEDIMENTS

Alexey Yu. Vinogradov^{1,2}, Viktor A. Obyazov¹,
Tatiana A. Vinogradova^{1,3},
Mariya M. Kadatskaya¹

¹Scientific and Industrial Research Association
Gidrotehproekt, Valday, Russia;

²Saint Petersburg State Forest Technical University,
St. Petersburg, Russia;
³Saint Petersburg State University,
St. Petersburg, Russia
gd@npogtp.ru

Аннотация. Значения неразмывающих скоростей для различных типов донных отложений (связных и несвязных) приводятся в нормативной документации в виде таблиц и графиков. Кроме этого, существует ряд нормативных документов, содержащих методики их расчета. Эти методики основаны на эмпирических зависимостях, адаптированных к конкретным специфическим условиям. Расчетные значения средних неразмывающих скоростей пропорциональны глубине потока и диаметру частиц в случае размыва несвязных донных отложений.

Авторами статьи сделана попытка оценить неразмывающую скорость потока путем физического подхода к проблеме в зависимости от угла внутреннего трения, расчетного сцепления несвязных донных отложений (грунтов) и глубины водной толщи над размываемым участком дна. Данный подход должен являться универсальным.

Анализ полученных результатов показал, что предложенная формула расчета придонных неразмывающих скоростей во всех рассмотренных случаях дает результаты значительно больше значений, приведенных в нормативных документах для соответствующих градаций

Abstract. There are the values of non-eroding water velocities for various types of bottom sediments (incoherent and cohesive) given in the normative documentation in the form of tables and graphs. Also there are a number of regulatory documents containing methods for calculation such velocities. These methods are based on empirical dependencies adapted to specific conditions. The calculated mean non-eroding water velocities are proportional to the depth of flow and bottom particle size in the case of incoherent bottom sediments erosion.

The authors made an attempt to estimate non-eroding water velocity by a physical approach to the problem depending on the internal friction angle, the calculated clutch of incoherent bottom sediments and the depth of the water over the bottom. This approach should be universal.

An analysis of the results indicated that the proposed formula for calculating bottom non-eroding water velocities in all considered cases gives results significantly higher than the values given in the regulatory documents for the corresponding size of incoherent bottom sediments. As a result authors obtained non-eroding water velocities, which were overestimated at times on the basis of expert evaluation. When the depth changes from 0.5 to 10 m, the

крупности несвязных донных отложений. В результате расчетов были получены неразмывающие скорости, на основании экспертной оценки, завышены в несколько раз. При изменении глубины потока от 0,5 до 10 м разброс оцененных придонных скоростей колеблется от 14 до 22% в зависимости от крупности несвязного грунта. Сделан вывод, что чем меньше частицы несвязного грунта, тем меньше отклонение рассчитанных значений придонных неразмывающих скоростей от нормативных (для крупнозернистых гравелистых песков при глубине потока 10 м отклонение от нормативных значений достигают 375-510%). Кроме того, прослеживается зависимость величин придонной неразмывающей скорости от глубины потока, что не предусмотрено нормативными документами.

Авторы предлагают научному сообществу подключиться к обсуждению причин таких несоответствий.

Ключевые слова: придонная неразмывающая скорость; несвязные грунты; прочностные характеристики грунтов; закон Кулона; касательные напряжения; коэффициент шероховатости; коэффициент гидравлического трения.

Условные обозначения

V_{cp} – средняя скорость потока, м/с;

V_{np} – средняя неразмывающая скорость, м/с;

α , β и γ – эмпирические коэффициенты¹;

H – глубина потока, м;

d_{cp} – средний диаметр частиц донных отложений, м;

σ – нормальное давление грунта, Па или $кг/м \cdot c^2$;

ρ_s – отношение массы сухого грунта (исключая массу воды в его порах) к объему твердой части этого грунта, принят равным $2660 кг/м^3$;

g – ускорение свободного падения, $9,81 м/с^2$;

ε – пористость, определяемая по формуле

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s};$$

spread of estimated bottom velocities varies from 14 to 22%, depending on the size of the incoherent soil.

It was concluded that for smaller particles of incoherent soil, the less deviation of the calculated values of bottom non-eroding water velocities from the normative ones (for massive gravel sands at a 10 m flow depth, the deviation from the normative values reaches 375-510%). In addition, the dependence of the value bottom non-eroding water velocity on the depth is traced, which is not provided in regulatory documents.

The authors offer the scientific community to join to discussion of the reasons for these discrepancies.

Keywords: bottom non-eroding water velocity; incoherent bottom sediments; strength features of soils; Coulomb's law; shear stresses; roughness coefficient; hydraulic friction coefficient.

ρ_d – отношение массы сухого грунта (исключая массу воды в его порах) к занимаемому этим грунтом объему, $кг/м^3$;

τ – напряжение, препятствующее сдвигу участка дна, Па или $кг/(м \cdot c^2)$;

φ – угол внутреннего трения размываемого грунта, град.;

c – сцепление грунта, Па или $кг/(м \cdot c^2)$;

τ_c – сдвигающее напряжение, Па или $кг/(м \cdot c^2)$;

ρ_0 – плотность воды, $1000 кг/м^3$;

V_* – динамическая скорость (скорость трения), м/с: $V_* = \sqrt{gHi}$;

i – гидравлический уклон, б/р;

¹ СП 32-102-95 Сооружения мостовых переходов и подтопляемых насыпей. Методы расчета местных размывов. М.: Транстрой, 1996.

C – коэффициент Шези, $m^{1/2}/c$, определяемый по формуле Н.Н. Павловского: $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$;

R – гидравлический радиус, $R \approx H$, м;

n – коэффициент шероховатости, в условиях отсутствия гряд и других форм микрорельефа рассчитывается по формуле Штриклера: $n = \frac{d^a}{b}$,

при этом коэффициенты $a = \frac{1}{6} \approx 0,17$;

$b = \frac{\sqrt{g}}{0,15} \approx 20,88$ [Барышников, 2003].

$V_{прд}$ – осредненная продольная придонная скорость на глубине y , м/с;

y – ордината по оси, перпендикулярной поверхности дна потока, м;

Δ – высота выступов шероховатостей, м, определяемая по формуле $\Delta = \frac{2}{3} d$;

λ – коэффициент гидравлического трения, б/р;

k – эмпирический коэффициент при расчете λ , принятый равным 3,5 [Боровков, Волынов, 2013];

c_p – расчетное сцепление грунта, Па или $кг/(м \cdot c^2)$;

c_n – нормативное сцепление грунта, Па или $кг/(м \cdot c^2)$;

γ_g – коэффициент надежности по грунту, используемый при оценке c_p , при отсутствии данных испытаний образцов грунта можно принимать максимальное значение $\gamma_g = 2^2$.

Введение

Одним из основных параметров для инженерных расчетов водопропускных и водоотводных сооружений является неразмывающая скорость [Кадацкая и др., 2019]. Основным критерием устойчивости проектируемого сооружения является выполнение условия $V_{cp} < V_{пр}$.

Значения неразмывающих скоростей для различных типов донных отложений (связных и несвязных) приводятся в нормативной документации в виде таблиц и графиков. Кроме

этого, существует ряд нормативных документов, содержащих методики их расчета, например СП 32-102-95³.

Эти методики основаны на эмпирических зависимостях, адаптированных к конкретным специфическим условиям. Расчетные значения средних неразмывающих скоростей пропорциональны глубине потока и диаметру частиц в случае размыва несвязных донных отложений и среднему размеру смываемых частиц (агрегатов, «отдельностей») в случае размыва связного грунта и в общем виде могут быть представлены следующим образом:

$$V_{пр} \approx \alpha \cdot H^\beta \cdot d_{cp}^\gamma \quad (1)$$

Значения коэффициентов могут различаться в несколько раз [Кадацкая и др., 2019] в зависимости от местных условий, что неприемлемо с точки зрения универсальности.

Попытаемся оценить неразмывающую скорость путем физического подхода к проблеме.

Методика

Нормальное давление или сжимающее напряжение σ , оказываемое смываемым грунтом на единичную площадку, равно:

$$\sigma = (\rho_s - \rho_0)gd_{cp}(1 - \varepsilon) \quad (2)$$

Напряжение, препятствующее сдвигу размываемого участка дна, площадью S , равно:

$$\tau = \sigma \cdot tg\varphi + c = (\rho_s - \rho_0)gd_{cp}(1 - \varepsilon) \cdot tg\varphi + c \quad (3)$$

Сдвигающее касательное напряжение на границе дно-поток [Гришанин, 1969]:

$$\tau_c = \rho_0 V_*^2 = \rho_0 \cdot gHi = \frac{\rho_0 g V_{cp}^2}{C^2} \quad (4)$$

Сдвиг донной отмостки произойдет в момент, когда $\tau_c > \tau$. Критическое равновесие имеет место при равенстве $\tau_c = \tau$. Запишем это уравнение в виде:

² Там же

³ Там же

$$\rho_0 g \frac{V_{cp}^2}{C^2} = \sigma \cdot tg \varphi + c \quad (5)$$

$$V_{cp} = \sqrt{\frac{C^2 \tau}{\rho_0 g}} = C \sqrt{Hi} \quad (6)$$

Уравнение (6) выражает зависимость средней неразмывающей скорости от угла внутреннего трения и сцепления грунта или донных отложений, являясь универсальным для любых грунтов.

К придонной скорости можно, например, перейти по зависимости В.Н. Гончарова [Кадацкая и др., 2020]:

$$V_{прд} = V_{cp} \frac{1,25}{\lg 6,15 \frac{H}{\Delta}} \quad (7)$$

Также возможен расчет неразмывающих скоростей с использованием коэффициента гидравлического трения λ вместо коэффициента Шези. В этом случае сдвигающее напряжение турбулентного потока будет определяться по формуле [Барышников, 2003]:

$$\tau_c = \rho_0 \lambda \frac{V_{cp}^2}{2} \quad (8)$$

$$\rho_0 \lambda \frac{V_{cp}^2}{2} = \sigma \cdot tg \varphi + c \quad (9)$$

откуда

$$V_{cp} = \sqrt{\frac{2\tau}{\rho_0 \lambda}} \quad (10)$$

Для расчета λ могут использоваться формулы: А.П. Зегжды (11), В.Н. Гончарова (12), Маннинга-Штриклера (13) [Виноградов и др., 2019]:

$$\lambda = \frac{1}{(4 \lg H / kd_{cp} + 4,25)^2} \quad (11)$$

$$\lambda = \frac{1}{(4 \lg 6,15H / kd_{cp})^2} \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{2}{(V_{cp} / V_*')^2} \quad (13)$$

По формуле 13 оценивается правильность вычисленного соотношения значений скорости и коэффициента гидравлического трения.

Результаты и их обсуждение

Проведены расчеты неразмывающих скоростей при условии движения равномерного плоского потока с несвязными донными отложениями, условно состоящими из однородных песков.

Значения угла внутреннего трения песчаных грунтов четвертичных отложений для расчетов взяты из таблицы 1 Приложения 1 СНиП 2.02.01-83 (нормативные) и таблицы 1.4 [Ялтанец и др., 2008] (водонасыщенные пески). Значения сцепления для переувлажненных аллювиальных пылеватых песков получены опытным путем.

Придонные неразмывающие скорости рассчитаны по формуле (7) с учетом формулы (6). Результаты расчетов представлены в таблице 1 для различных градаций песчаных грунтов. Для сравнения приведены нормативные значения придонных неразмывающих скоростей для соответствующих градаций крупности несвязных донных отложений в соответствии с таблицей 6 СО 34.21.204-2005⁴ и таблицей 2 ВТР-П-25-80⁵.

Стоит отметить, что значения средних скоростей потока, полученные по формуле (10), отличаются от полученных по зависимости (6) скоростей не более чем на 5%.

⁴ СО 34.21.204-2005 Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов. СПб.: Из-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2006.

⁵ ВТР-П-25-80 Руководство по определению допускаемых неразмывающих скоростей водного потока для различных грунтов при расчете каналов. М.: Из-во Мин-ва мелиорации и водного хозяйства СССР, 1981.

Таблица 1. Результаты расчетов придонной неразмывающей скорости течения

Table 1. Calculated bottom non-eroding water velocity

Параметры	Глубина, м				
	0,5	1,0	3,0	5,0	10,0
Мелкий гравий ($d=2$ мм; $n=0,017$; $\varepsilon=0,39$; $e=0,64$; $\varphi=35^\circ$; $\tau=13,9$ кг/(мс²))					
Гидравлический уклон, i , б/р	0,002836	0,001418	0,000473	0,000284	0,000142
Коэффициент Шези, C , м ^{1/2} /с	52,4	58,8	70,6	76,9	86,3
Средняя скорость течения, $V_{ср}$, м/с	1,97	2,22	2,66	2,90	3,25
Придонная неразмывающая скорость течения, $V_{прд}$, м/с	0,73	0,75	0,80	0,83	0,87
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по СО 34.21.204-2005)	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по ВТР-П-25-80)	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Крупный песок ($d=1$ мм, $n=0,015$; $\varepsilon=0,39$; $e=0,64$; $\varphi=32^\circ$; $\tau=6,2$ кг/(мс²))					
Гидравлический уклон, i , б/р	0,001265	0,000633	0,000211	0,000127	0,000063
Коэффициент Шези, C , м ^{1/2} /с	58,8	66,0	79,3	86,3	96,9
Средняя скорость течения, $V_{ср}$, м/с	1,48	1,66	1,99	2,17	2,44
Придонная неразмывающая скорость течения, $V_{прд}$, м/с	0,50	0,52	0,56	0,58	0,61
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по СО 34.21.204-2005)	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по ВТР-П-25-80)	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Средний песок ($d=0,5$ мм, $n=0,013$; $\varepsilon=0,39$; $e=0,64$; $\varphi=28^\circ$; $\tau=2,64$ кг/(мс²))					
Гидравлический уклон, i , б/р	0,000538	0,000269	0,000090	0,000054	0,000027
Коэффициент Шези, C , м ^{1/2} /с	66,0	74,1	89,0	96,9	108,8
Средняя скорость течения, $V_{ср}$, м/с	1,08	1,22	1,46	1,59	1,78
Придонная неразмывающая скорость течения, $V_{прд}$, м/с	0,34	0,36	0,38	0,40	0,42
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по СО 34.21.204-2005)	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по ВТР-П-25-80)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Средний песок ($d=0,2$ мм, $n=0,012$; $\varepsilon=0,39$; $e=0,64$; $\varphi=25^\circ$; $\tau=0,92$ кг/(мс²))					
Гидравлический уклон, i , б/р	0,000189	0,000094	0,000031	0,000019	0,000009
Коэффициент Шези, C , м ^{1/2} /с	76,9	86,3	103,7	112,9	126,7
Средняя скорость течения, $V_{ср}$, м/с	0,75	0,84	1,01	1,10	1,23
Придонная неразмывающая скорость течения, $V_{прд}$, м/с	0,21	0,22	0,24	0,26	0,27
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по СО 34.21.204-2005)	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по ВТР-П-25-80)	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105
Мелкий песок ($d=0,1$ мм, $n=0,01$; $\varepsilon=0,39$; $e=0,64$; $\varphi=22^\circ$; $\tau=0,90$ кг/(мс²); $c=0,5$ Па)					
Гидравлический уклон, i , б/р	0,000184	0,000092	0,000031	0,000018	0,000009
Коэффициент Шези, C , м ^{1/2} /с	86,3	96,9	116,4	126,7	142,3
Средняя скорость течения, $V_{ср}$, м/с	0,83	0,93	1,12	1,21	1,36
Придонная неразмывающая скорость течения, $V_{прд}$, м/с	0,22	0,23	0,26	0,27	0,29

Параметры	Глубина, м				
	0,5	1,0	3,0	5,0	10,0
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по СО 34.21.204-2005)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по ВТР-П-25-80)	0,115	0,115	0,115	0,115	0,115
Пылеватый песок ($d=0,05$ мм, $n =0,009$; $\varepsilon=0,39$; $e=0,64$; $\varphi =20^\circ$; $\tau =1,18$кг/(мс²); $c= 1$ Па)					
Гидравлический уклон, i , б/р	0,000241	0,000120	0,000040	0,000024	0,000012
Коэффициент Шези, C , м ^{1/2} /с	96,9	108,8	130,6	142,3	159,7
Средняя скорость течения, V_{cp} , м/с	1,06	1,19	1,43	1,56	1,75
Придонная неразмывающая скорость течения, $V_{прд}$, м/с	0,27	0,28	0,31	0,33	0,35
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по СО 34.21.204-2005)	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
Придонная неразмывающая скорость течения, м/с (по ВТР-П-25-80)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13

Для сравнения в таблице 2 приведены расчеты неразмывающих скоростей для мелких и пылеватых песков по тем же формулам, но с учетом нормативных значений угла внутреннего трения и сцепления, приведенных в таблице 1 Приложения 1 СНиП 2.02.01-83. Сцепление для песков таких размеров уже имеет место, поскольку они в плотном состоянии начинают приобретать характеристики связности. Меньшие значения угла внутреннего трения и сцепления скорректированы согласно [Ялтанец и др., 2008] и СП 32-102-95 Приложение А.6.

Нормативные значения удельного сцепления c_n п.2.75 прил. 1 Пособие к СНиП 2.02.01-83¹⁵. Эти значения при практических расчетах должны быть скорректированы в сторону уменьшения, согласно СП 32-102-95 Приложение А.6., где указано, что «при расчете местных размывов

основной характеристикой связного грунта является расчетное сцепление c_p , определяемое по формуле $c_p = c_n / \gamma_g$, где c_n — нормативное сцепление, определяемое... в состоянии капиллярного водонасыщения при полной влагоемкости; γ_g — коэффициент надежности по грунту, при отсутствии данных испытаний образцов грунта можно принимать максимальное значение $\gamma_g = 2$ ».

Анализ полученных результатов показывает, что предложенная формула расчета придонных неразмывающих скоростей во всех рассмотренных случаях дает результаты значительно больше нормативных значений, приведенных в ВТР-П-25-80 и СО 34.21.204-2005 для соответствующих градаций крупности несвязных отложений. Полученные скорости, на основании экспертной оценки, завышены в несколько раз.

Таблица 2. Расчетные величины средних неразмывающих скоростей потока, м/с, при различных глубинах для мелкозернистых и пылеватых песков

Table 2. Calculated values of average non-eroding water velocities, m/s, at various depths for fine-grained and dusty sands

песок	φ , град	с, Па	H, м				
			0,5	1	3	5	10
мелкозернистый	22	1000	27,6	31,0	37,2	40,5	45,4
	32	2000	39,0	43,8	52,6	57,2	64,2
пылеватый	18	2000	43,8	49,1	59,0	64,2	72,1
	30	4000	61,9	69,5	83,4	90,8	102,0

¹⁵ Пособие по проектированию оснований зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83). М.: Стройиздат, 1986.

Стоит отметить, что согласно нормативным документам значения придонных неразмывающих скоростей не зависят от глубины потока, в то время как формулы (4) и (7) в явном виде демонстрирует такую зависимость. При изменении глубины потока от 0,5 до 10 м разброс оцененных придонных скоростей колеблется от 14 до 22% в зависимости от крупности несвязного грунта.

Ранее авторами [Кадацкая и др., 2020] было показано, что неразмывающая скорость на выступе шероховатостей однородных несвязных грунтов крупностью 1 мм при средней скорости потока 0,5 м/с и глубине потока 5 м, рассчитанная с использованием различных подходов, находится в пределах 0,132-0,175, что вполне совпадает с нормативными данными, и меньше рассчитанных по формуле (7) на 300 и более процентов (таблица 1).

Литература

Барышников Н.Б. Гидравлические сопротивления речных русел: учебное пособие. СПб.: изд. РГГМУ, 2003. 147 с.

Боровков В.С., Волюнов М.А. Размыв речного русла в грунтах, обладающих сцеплением // Вестник МГСУ. 2013. Том 8. № 4. С. 143-149. DOI: [10.22227/1997-0935.2013.4.143-149](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2013.4.143-149)

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. Расчёт неразмывающих скоростей водного потока на высоте верхней границы пограничного слоя // Resources and Technology. 2019. Т. 16. № 3. С. 44-61. DOI: [10.15393/j2.art.2019.4782](https://doi.org/10.15393/j2.art.2019.4782).

Гришанин К.В. Динамика русловых потоков. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 428 с.

Кадацкая М.М., Виноградов А.Ю., Кацадзе В.А., Беленький Ю.И., Бачериков И.В., Хвалев С.В., Каляшов В.А. Анализ методов расчета неразмывающей скорости при проектировании водопропускных и водоотводных сооружений лесного

Выводы

- 1) чем меньше частицы несвязного грунта, тем меньше отклонение рассчитанных значений придонных неразмывающих скоростей от нормативных (для крупнозернистых гравелистых песков при глубине потока 10 м отклонение от нормативных значений достигают 375-510%);
- 2) прослеживается зависимость величин придонной неразмывающей скорости от глубины потока, что не предусмотрено нормативными значениями;
- 3) по результатам расчетов становится понятным, почему для расчетов неразмывающих скоростей ни разу не использовались физически обоснованные методики. Расчеты, проведенные по элементарным формулам, с использованием нормативных значений угла внутреннего трения и сцепления приводят к нереальным значениям.

Авторы предлагают научному сообществу подключиться к обсуждению причин таких несоответствий.

References

Baryshnikov N.B. *Gidravlicheskie soprotivleniya rechnykh rusel: Uchebnoe posobie [Hydraulic resistance of river channels]*. Saint-Petersburg, Publ. of the Russian State Hydrometeorological University, 2003. 147 p. (In Russian).

Borovkov V.S., Volynov M.A. Razmyv rechnogo rusla v gruntakh, obladayushchikh stsepleniem [River bed erosion in cohesive soils]. *Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]*, 2013, vol. 8, iss. 4, pp. 143-149. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.22227/1997-0935.2013.4.143-149](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2013.4.143-149)

Grishanin K.V. *Dinamika ruslovykh potokov [The dynamics of channel flows]*. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 1969. 428 p. (In Russian).

Kadatskaya M.M., Vinogradov A.Yu., Katsadze V.A., Belen'kii Yu.I., Bacherikov I.V., Khvalev S.V., Kalyashov V.A. Analiz metodov rascheta nerazmyvayushchei skorosti pri proektirovanii vodopropusknykh i vodootvodnykh sooruzhenii lesnogo khozyaistva [Analysis of methods for calculating non-eroding speed in the design of culverts]

хозяйства // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 227. С. 174-187.

DOI: [10.21266/2079-4304.2019.227.174-187](https://doi.org/10.21266/2079-4304.2019.227.174-187)

Кадацкая М.М., Виноградов А.Ю., Обызов В.А., Кацадзе В.А., Угрюмов С.А., Бельский Ю.И., Бирман А.Р., Хвалев С.В., Кучмин А.В., Бачериков И.В., Коваленко Т.В. Расчет неразмывающих скоростей на высоте выступов шероховатости донных отложений // Системы. Методы. Технологии. 2020. № 1 (45). С. 80-84.

DOI: [10.18324/2077-5415-2020-1-80-84](https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-1-80-84)

Ялтанец И.М., Тухель А.Э., Леванов Н.И., Дятлов В.М. Переработка горных пород с использованием средств гидромеханизации: Учебное пособие. М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2008. 318 с.

and drainage forestry facilities]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii [Izvestiya Sankt-Peterburgskoj Lesotehničeskoj Akademii]*, 2019, iss. 227, pp. 174-187. (In Russian; abstract in English).

DOI: [10.21266/2079-4304.2019.227.174-187](https://doi.org/10.21266/2079-4304.2019.227.174-187)

Kadatskaya M.M., Vinogradov A.Yu., Obyazov V.A., Katsadze V.A., Ugryumov S.A., Belen'kii Yu.I., Birman A.R., Khvalev S.V., Kuchmin A.V., Bacherikov I.V., Kovalenko T.V. Raschet nerazmyvayushchikh skorostei na vysote vystupov sherokhovatosti donnykh otlozhenii [Calculation of non-eroding velocities at the height of surface asperity of bottom sediments]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii [Systems. Methods. Technologies]*, 2020, 1(45), pp. 80-84. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.18324/2077-5415-2020-1-80-84](https://doi.org/10.18324/2077-5415-2020-1-80-84)

Vinogradov A.Yu., Kadatskaya M.M., Birman A.R., Vinogradova T.A., Obyazov V.A., Katsadze V.A., Ugryumov S.A., Bacherikov I.V., Kovalenko T.V., Khvalev S.V., Parfenov E.A. Raschet nerazmyvayushchikh skorostei vodnogo potoka na vysote verkhnei granitsy pograničnogo sloya [Calculation of non-eroding water flow velocities at the height of the upper boundary layer]. *Resources and Technology [Resources and Technology]*, 2019, vol. 16, no. 3, pp. 44-61. (In Russian; abstract in English). DOI: [10.15393/j2.art.2019.4782](https://doi.org/10.15393/j2.art.2019.4782).

Yaltanets I.M., Tukhel' A.E., Levanov N.I., Dyatlov V.M. *Pererabotka gornyx porod s ispol'zovaniem sredstv gidromekhanizatsii: Uchebnoe posobie [Rock Processing Using Hydro-mechanization: A Training Manual]*. Moscow, Publ. of Moscow State Mining University, 2008. 318 p. (In Russian).