

С.А. СЕРГЕЕВ, Л.В. ВОЛГИНА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», г. Москва, Российская Федерация

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСКАЕМОЙ ДОННОЙ НЕРАЗМЫВАЮЩЕЙ СКОРОСТИ В УСЛОВИЯХ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

*Строительство и эксплуатация гидроузлов приводит к изменению режима движения воды в реке до и после сооружений. Одним из результатов изменения режима являются деформации русла в нижнем бьефе, которые могут оказывать влияние на устойчивость как всего гидроузла в целом, так и на его отдельные элементы. Деформации русла в нижнем бьефе в большей степени определяются неоднородностью сбросного потока и его избыточной турбулизацией. В настоящей работе проводилась сравнительная оценка расчетных значений допускаемых донных неразмывающих скоростей согласно нормативным источникам и собственным расчетам, исходя из условия обеспечения устойчивости частиц грунта с учетом турбулентности. Для статистической оценки влияния турбулентности использовался метод квадрантов, позволяющий представить общий процесс переноса масс жидкости на отдельные составляющие (вклады) в четырех направлениях. Данная классификация позволила качественно оценить влияние турбулентности на величину донной неразмывающей скорости. Результаты расчетов показали, что устойчивость частиц грунта в равной мере определяет не только максимальная мгновенная скорость на высоте выступа шероховатости, но и учет турбулентности, что в итоге приводит к снижению уровня допускаемой неразмывающей донной скорости потока, особенно при размере частиц грунта  $d < 0,4$  мм на 20-50%, по сравнению с данными расчетов по нормативным источникам.*

*Турбулентность, пульсации скорости, донная неразмывающая скорость, метод квадрантов*

**Введение.** Изучению неразмывающей скорости потока посвящено большое количество работ как зарубежных, так и российских ученых [1]. Существующие зависимости для определения неразмывающей скорости определяются условием обеспечения устойчивости частиц грунта, традиционно связанные либо с предельно влекущей силой, либо с подъемной силой [2]. Анализируя накопленный опыт, для средней неразмывающей скорости потока можно написать следующую функциональную зависимость:

$$v_0 = f(\gamma_{\delta a}, \gamma, \bar{d}, H, S, T, \dots), \quad (1)$$

где  $\gamma_{\delta a}$ ,  $\gamma$  – удельный вес частиц грунта и воды,  $d$  – диаметр равновеликого шара, эквивалентный объему отдельной твердой частицы грунта или  $\bar{d}$  – средневзвешенный диаметр твердых частиц грунта,  $H$  – глубина потока,  $S$  – консистенция потока,  $T$  – обобщающий параметр, учитывающий турбулентность потока,  $N$  – обобщающий параметр, учитывающий связанность между частицами грунта и др.

Так, при различных гидравлических условиях влияние того или иного фактора (вес и форма частиц грунта, консистенция, интенсивность турбулентности) может быть различно. Известно, что в условиях турбулент-

ного потока воздействие пульсаций скорости на процессы размыва грунта определяется прежде всего интенсивностью турбулентности [3], которая имеет свой максимум в придонной области потока [3,4]. В условиях, когда пульсации скорости у дна велики по сравнению с осредненной скоростью, устойчивость частиц грунта зависит не только от значения максимальной придонной скорости. Согласно опытным данным [5, 6], чем больше полуразмах пульсаций скорости по сравнению с местной осредненной скоростью, тем меньше допустимая максимальная придонная скорость.

**Материал и методы.** Целью настоящей работы является сравнительная оценка расчетных значений допускаемых донных неразмывающих скоростей согласно нормативным источникам [7] (по формуле Ц.Е. Мирцхулава) и собственным расчетам, исходя из условия равновесия с учетом турбулентности, схема которого представлена на рисунке 1 для русла, ложе которого сложено из несвязных грунтов.

Так, если частица заклинена между другими частицами, то в условиях покоя на нее действует подъемная сила, которая уравновешивается весом частиц грунта, си-

лой сцепления частиц с окружающими частицами грунта, а также гидростатической «пригрузкой». Согласно [8], для частиц зернистого грунта с крупностью зерен около

1 мм условие отрыва частиц грунта связано только с соотношением подъемной силы  $F_n$  с силой веса  $G$  зерен грунта (за вычетом Архимедовой силы).

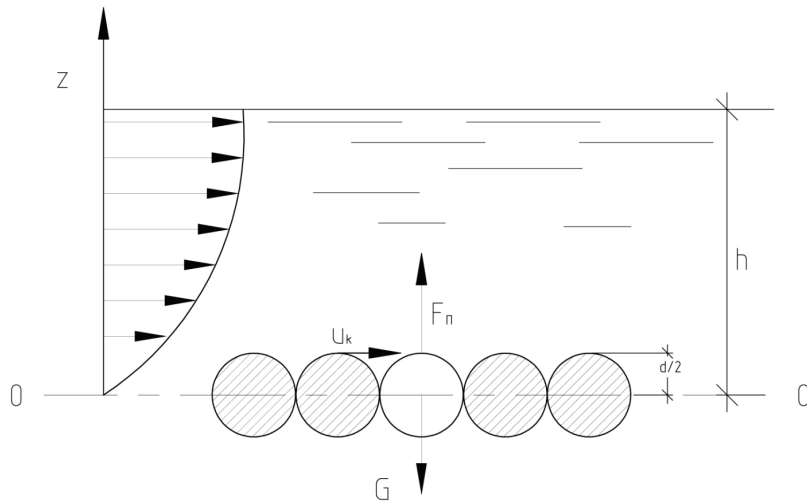


Рис. 1. Схема взвешивания частиц донного грунта

Условие равновесия частиц несвязного грунта будет иметь вид:

$$F_n = G, \quad (1)$$

где подъемная сила –  $F_n$  и сила веса –  $G$ .

$$F_n = C_n \rho \frac{u_k^2}{2} \frac{\pi d^2}{4} \quad (2)$$

$$G = (\rho_{m\phi} - \rho) g \frac{\pi d^3}{6}, \quad (3)$$

где  $C_n$  – коэффициент подъемной силы,  $d$  – диаметр частиц грунта,  $u_k$  – скорость на вершине частиц грунта, которая может быть определена, например, с использованием логарифмического профиля скорости [8],  $\rho_{m\phi}$ ,  $\rho$  – плотность твердых частиц и воды.

Подставив (2) и (3) в исходное (1), выразим скорость на вершине частиц грунта, которая в условии равновесия будет являться критической:

$$u_k = u_{кр} = \sqrt{\frac{4}{3} \left( \frac{\rho_{m\phi}}{\rho} - 1 \right) \frac{gd}{C_n}} = 1,15 \sqrt{\left( \frac{\rho_{m\phi}}{\rho} - 1 \right) \frac{gd}{C_n}}. \quad (4)$$

Стоит отметить, что формула (4) не учитывает пульсации скорости, которые характерны для турбулентного потока.

Для статистической оценки влияния турбулентности на значение критической неразмываемой донной скорости использовался метод квадрантов [9, 10], где пульсации скорости представляются в виде графика (по осям  $x$  и  $z$ ) [9], как показано схематично на рисунке 2.

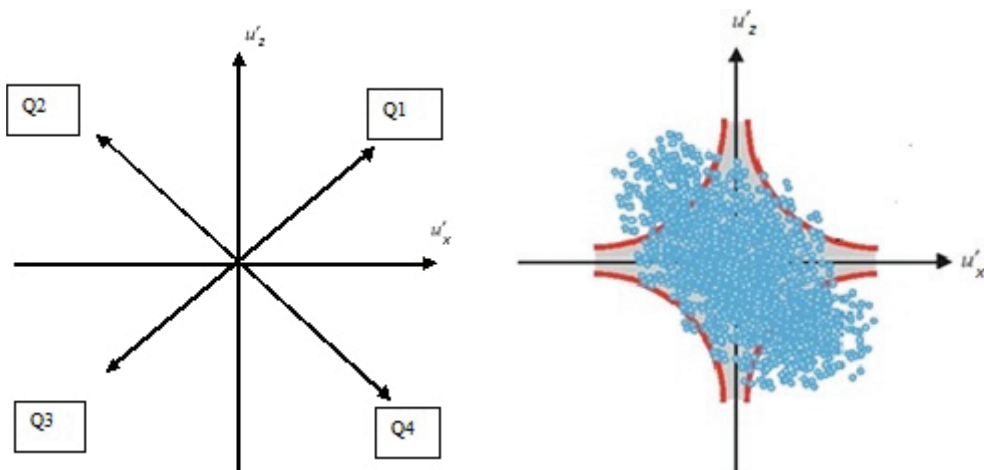


Рис. 2. Определение квадрантов

Квадранты Q1 ( $u'_x > 0, u'_z > 0$ ) и Q2 ( $u'_x < 0, u'_z > 0$ ) определяют отрыв частицы грунта, следовательно условие взвешивания частиц донного несвязного грунта можно записать в виде:

$$C_{II} \rho \frac{u_{kp}^2}{2} \frac{\pi d^2}{4} + C_{II} \rho \frac{\overline{\alpha u'_x u'_z}}{2} \frac{\pi d^2}{4} > (\rho_{ms} - \rho) g \frac{\pi d^3}{6}, \quad (5)$$

где  $a$  – коэффициент, учитывающий вес квадранта (согласно расчетам [11], коэффициент  $a$  принимает значения от 0,6 до 2,2), получаем уточненную формулу критической неразмывающей скорости с учетом турбулентности:

$$u_{кр} = 1,15 \sqrt{\left( \frac{\rho_{ms}}{\rho} - 1 \right) \frac{gd}{C_{II}} - \overline{\alpha u'_x u'_z}}. \quad (6)$$

**Результаты и обсуждение.** Данные расчетных значений допускаемых донных

неразмывающих скоростей, по формуле Ц.Е. Мирцхулава [7] и формулам (4) и (6), представлены в таблице 1 и (рис. 3).

Анализ графиков, представленных на рисунке 3, показал, что хорошая сходимость расчетных значений допускаемых донных неразмывающих скоростей согласно нормативным источникам (по формуле Ц.Е. Мирцхулава) и собственных расчетов по формуле (6) наблюдается только при размерах частиц грунта  $d = 0,4-0,7$  мм (область II на рис. 3). При размере частиц грунта  $d < 0,4$  мм (область I на рис. 3) учет турбулентности приводит к уменьшению допустимых значений неразмывающих донных скоростей на 20-50% по сравнению с данными расчетов по нормативным источникам.

Таблица 1

**Расчетные значения допускаемых донных неразмывающих скоростей**

Диаметр частиц грунта $d$ , мм	Допускаемая неразмывающая донная скорость потока по формуле Ц.Е. Мирцхулава, м/с	Допускаемая неразмывающая донная скорость потока по (4) без учета пульсаций скорости, м/с	Допускаемая неразмывающая донная скорость потока по (6) с учетом пульсаций скорости, м/с
0,15	0,1	0,08	0,05
0,25	0,11	0,10	0,08
0,37	0,12	0,13	0,11
0,5	0,13	0,15	0,13
0,75	0,16	0,18	0,17
1,00	0,17	0,21	0,20

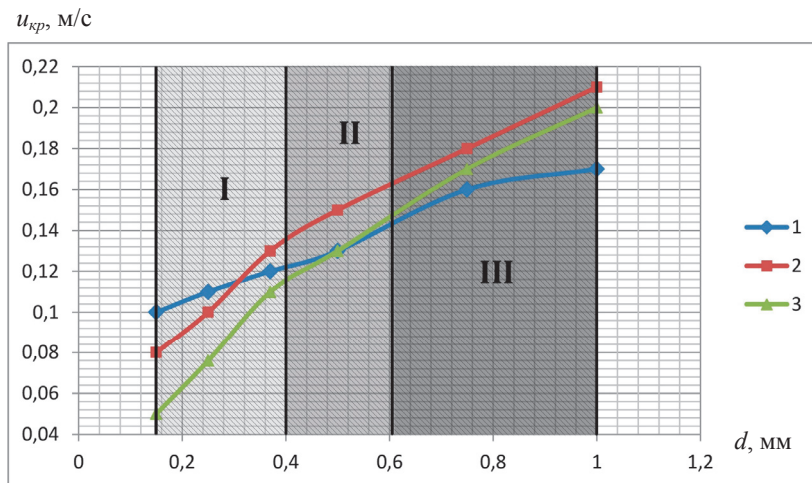


Рис. 3. Допускаемая неразмывающая донная скорость потока:  
 1 – по формуле Ц.Е. Мирцхулава (для несвязных грунтов);  
 2 – по формуле (4) без учета пульсаций скорости;  
 3 – по формуле (6) с учетом пульсаций скорости

**Выводы**

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что на устойчивость частиц несвязного грунта (особенно при размере частиц грунта  $d < 0,4$  мм) в равной

мере может влиять не только максимальная мгновенная скорость на высоте выступа шероховатости, но и пульсации скорости, что в итоге приводит к снижению уровня допускаемой неразмывающей донной

скорости потока. Как пример, предложенная методика учета турбулентности может быть использована для более точного прогнозирования деформаций русел в нижних бьефах гидроузлов.

#### Библиографический список

1. **Ибад-заде Ю.А.** Транспортирование воды в открытых каналах. – М.: Стройиздат, 1983. – 272 с.
2. **Лелявский С.И.** Введение в речную гидравлику. Пер. с англ. – Л.: Гидрометеоздат, 1961. – 230 с.
3. **Боровков В.С.** Русловые процессы и динамика речных потоков на урбанизированных территориях. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 286 с.
4. **Фидман Б.А.** Турбулентность водных потоков. – Л.: Гидрометеоздат, 1991. – 237 с.
5. **Кумин Д.И.** Турбулентность и гашение энергии при сопряжении бьефов. // Известия ВНИИГ. – 1956. – Т. 55. – С. 47-55.
6. **Базилевич В.А.** Воздействие турбулентного потока на русло, сложенное несвязными грунтами в условиях плоской задачи. // Доклады АН УССР. – 1961. – № 11. – С. 71-83.
7. ВТР-II-25-80. Руководство по определению допускаемых неразмывающих скоростей водного потока для различных грунтов при расчете каналов. – М.: Минводхоз СССР, 1981. – 58 с.
8. **Брянская Ю.В., Маркова И.М., Остякова А.В.** Гидравлика водных и взвешенных потоков в жестких и деформируемых границах. / Под ред. В.С. Боровкова. – М.: Изд-во Ассоц. строит. вузов, 2009. – 263 с.
9. **Subhasish D.** Fluvial Hydrodynamics: Hydrodynamic and Sediment Transport Phenomena – GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences, New Delhi, India, 2014. – p.158-162.
10. **Lu SS, Willmarth WW.** Measurements of the structures of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer. –1973. – J Fluid Mech 60: p. 481-511.
11. **Сергеев С.А., Волгина Л.В.** Статистическая оценка турбулентных касательных напряжений с помощью метода квадрантов. // Научное обозрение, 2017. – № 13. – С. 11-13.

Материал поступил в редакцию 11.01.2018 г.

#### Сведения об авторах

**Сергеев Станислав Алексеевич**, аспирант кафедры Гидравлики и гидротехнического строительства ФГБОУ ВО МГСУ; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; e-mail: stanislav\_sergeev91@mail.ru; тел.: +7 (903)0057282

**Волгина Людмила Всеволодовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры Гидравлики и гидротехнического строительства ФГБОУ ВО МГСУ; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; e-mail: volgin-gv@mail.ru; тел.: +7(495)2874914

**S.A. SERGEEV, L.V. VOLGINA**

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «National Research Moscow State University of Civil Engineering», Moscow, Russian Federation

## DETERMINATION OF THE PERMISSIBLE BOTTOM NON-ERODING VELOCITY IN THE TURBULENCE FLOW

*Construction and operation of hydraulic works leads to changing of the water movement regime in the river upstream and downstream the facility. One of the results of the regime change is the channel deformation in the downstream which may affect the stability both of the entire hydraulic unit and some elements. The channel deformations in the downstream are mainly determined by the heterogeneity of the discharged flow and its excessive turbulence. In the present paper there was carried out a comparative evaluation of the rated values of permissible bottom non-eroding velocities proceeding from the condition of the soil particles stability accounting for turbulence. In the first case, calculations were made according to normative sources. In the second case, calculations were made by the author based on the condition for ensuring the stability of soil particles with allowance for turbulence. Statistical estimation of the influence of turbulence was carried out using quadrant analysis. This method allowed us to present a general process of transferring the masses of a liquid to individual components (contributions) in four directions. This classification made it possible to estimate the influence of turbulence on the value of the bottom non-eroding velocity. The results of calculations showed that the stability of soil particles equally determines not only the maximum actual velocity at the surface asperity. The inclusion of turbulence reduces*

*the value of critical bottom velocity. When the particle size of the soil is  $d < 0.4$  mm, the value of the critical velocity is less by 20-50% compared to the data for calculations by normative sources.*

*Turbulence, velocity fluctuations, bottom non-eroding velocity, quadrant analysis*

### References

1. **Ibad-zade Yu.A.** Transportirovanie vody v otkrytyh kanalah. M.: Stroizdat, 1983. – 272 s.
2. **Lelyavsky S.I.** Vvedenie v rechnuyu gidravliku, per. s angl. – L.: Gidrometeoizdat, 1961. – 230 s.
3. **Borovkov V.S.** Ruslovye peremeny I dinamika rechnykh potokov na urbanizirovannykh territoriyah. – L.: Gidrometeoizdat, 1989. – 286 s.
4. **Fidman B.A.** Turbulentnost vodnykh potokov. – L.: Gidrometeoizdat, 1991. – 237 s. Turbulence of water currents.
5. **Koumin D.I.** Turbulentnost i gashenie energii pri sopryazhenii bjefov. // Izvestiya VNIIG. – T. 55. – 1956. – ss. 47-55.
6. **Bazilevich V.A.** Vozdejstvie turbulentnogo potoka na ruslo, slozhennoe nesvyaznymi gruntami v usloviyah ploskoj zadachi. // Doklady AN USSR. – 1961. – № 11. – S. 71-83.
7. VTR-P-25-80. Rukovodstvo po opredele-niyu dopuskaemykh nerazmyvayushxhikh skoro-rostey vodnogo potoka dlya razlichnykh gruntov pri raschete kanalov. – M.: Minvodhoz SSSR, 1981. – 58 s.
8. **Bryanskaya Yu.V., Markova I.M., Ostyakova A.V.** Gidravlika vodnykh i vzvese-nesushxhikh potokov v zhestkikh i deformirue-mykh granitsah. / pod red. V.S. Borovkova. – M.: Izd-vo assots. stroit. vuzov, 2009. – 263 s.
9. **Subhasish D.** Fluvial Hydrodynamics: Hydrodynamic and Sediment Transport Phenomena – GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences, New Delhi, India, 2014. – p.158-162.
10. **Lu SS, Willmarth WW.** Measurements of the structures of the Reynolds stress in a tur-bulent boundary layer. – 1973. – J Fluid Mech 60:
11. **Sergeev S.A., Volgina L.V.** Statisti-cheskaya otsenka turbulentnykh kasatelnykh napryazhenij s pomoshchyu metoda kvadran-tov. // Nauchnoe obozrenie, 2017. – № 13. – S.11-13.

The material was received at the editorial office  
11.01.2018

### Information about the authors

**Sergeev Stanislav Alekseevich**, De-partment of hydraulics and hydraulic con-struction, FGBOU VO «National research Mos-cow State University of Civil Engineering»: 129337, 26, Yaroslavl highway, Moscow; e-mail: stanislav\_sergeev91@mail.ru; Tel. +7(903)0057282

**Volgina Lyudmila Vsevolodovna**, candi-date of technical sciences, associate pro-fessor of Department of hydraulics and hy-draulic construction, FGBOU VO «National research Moscow State University of Civil Engineering»: 129337, 26, Yaroslavl high-way, Moscow; e-mail: volgin-gv@mail.ru; Tel. +7(495)2874914