

А.О. Бондаренко

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЫВАЮЩЕЙ СКОРОСТИ ГРУНТА В ПОДВОДНОМ ЗАБОЕ, ОБРАЗОВАННОМ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУЕЙ

Отримана аналітична залежність для розрахунку розмиваючої швидкості ґрунту у підводному забої, який утворений у результаті взаємодії турбулентного струменя з масивом ґрунту. Отримана залежність для розрахунку гідродинамічного коефіцієнта підйомної сили для частинок ґрунту у підводному забої.

Получена аналитическая зависимость для определения размывающей скорости грунта в подводном забое, образованном в результате взаимодействия турбулентной водяной струи с массивом грунта. Получена зависимость для определения гидродинамического коэффициента подъемной силы для частицы в подводном забое.

Analytical dependence for determination of soil washing out speed in submarine face, formed as a result of turbulent aquatic stream with the soil array co-operating is got. Dependence for lift force hydrodynamic coefficient determination for a particle in submarine face is got.

По определению, размывающей скоростью  $U_p$  называют скорость горизонтального потока жидкости вдоль слоя грунта, при которой начинается единственный отрыв частиц грунта от массива.

Размывающая скорость является одной из гидравлических характеристик грунта, необходимых для определения рациональных конструктивных и технологических параметров ґрунтозаборных устройств, гидравлических рыхлителей и машин для подводной добычи полезных ископаемых в целом. Поэтому определение размывающей скорости является необходимой задачей для конструирования

ґрунтозаборных устройств и гидравлических рыхлителей.

Известные теоретические и эмпирические зависимости, полученные ранее Д.В. Рощупкиным [1] с применением физической модели размыва грунта всасывающим скоростным потоком, движущимся вдоль поверхности забоя под действием разрежения во всасывающем патрубке, не отражают в полной мере процессов, происходящих при вымывании частиц из массива грунта, при его подводном размыве турбулентной размывающей струей (рис. 1).

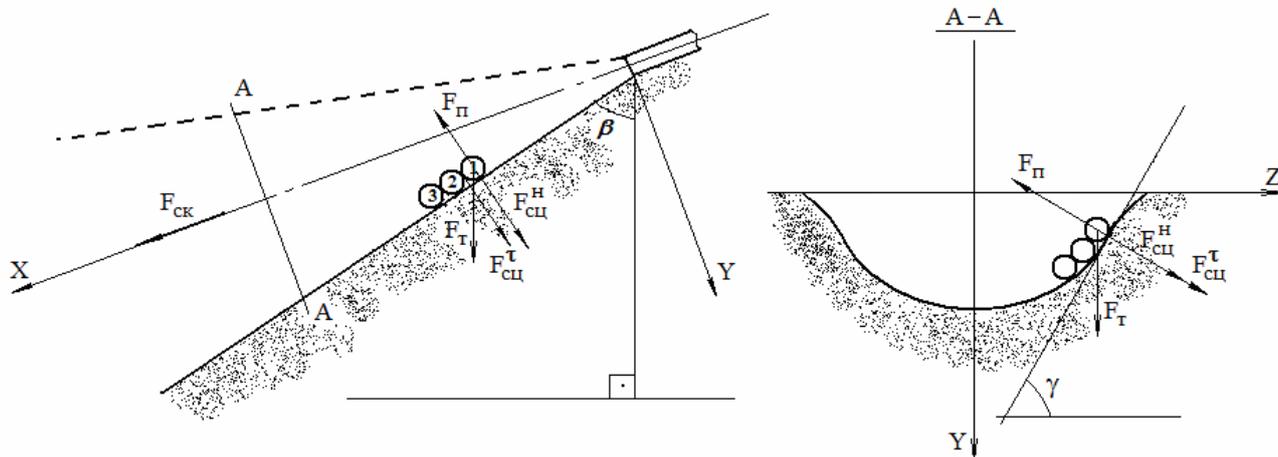


Рис. 1. Расчетная схема размыва ґрунта в подводном забое

Целью настоящей работы является установление аналитической зависимости для определения размывающей скорости ґрунта в любой точке подводного забоя турбулентной струи.

Рассмотрим процесс подводного размыва ґрунта затопленной турбулентной водяной струей (рис. 1).

С целью рационализации описания процесса введем следующие допущения:

а) частицы размываемого ґрунта представляют собой шары равных размеров  $d_1 = d_2 = d_n = \dots = d_{cp}$ ;

б) плотность жидкости, действующей на частицы ґрунта, равна плотности воды  $\rho_{ж} = \rho_{в}$ .

Определим условия, необходимые для отрыва единичной частицы от массива ґрунта при воздействии на нее скоростного напора  $F_{ск}$ .

На частицу действуют отрывающие от массива силы (рис. 1):

$$- \text{подъемная сила } F_n = C_n \frac{\pi d_{cp}^2}{4} \rho_b \frac{U^2}{2g}, \text{ кг,}$$

где  $C_n$  – коэффициент подъемной силы;  $U$  – скорость потока воды, действующего на частицу, м/с.  
Удерживающие силы:

$$- \text{сила веса } F_T = (\rho_{ск} - \rho_в) \frac{\pi d_{cp}^3}{6}, \text{ кг,}$$

где  $\rho_{ск}$  – плотность скелета грунта, кг/м<sup>3</sup>.

Проекция силы веса на нормаль к поверхности, на которой находится частица (рис. 1), равна

$$F_T^n = (\rho_{ск} - \rho_в) \frac{\pi d_{cp}^3}{6} \sin \beta \cos \gamma, \text{ кг,}$$

– нормальная сила сцепления с массивом

$$F_{сц}^n = \frac{\pi d_{cp}^2}{4} \sigma_p, \text{ кг,}$$

где  $\sigma_p$  – предел прочности сцепления исследуемого грунта на разрыв, кг/м<sup>2</sup>;

– тангенциальная сила сцепления с массивом

$$F_{сц}^r = \frac{\pi d_{cp}^2}{4} \sigma_{сц}, \text{ кг,}$$

где  $\sigma_{сц}$  – предел прочности сцепления исследуемого грунта на срез, кг/м<sup>2</sup>.

Равновесное состояние для частицы 1 соответствует равенству сил, приложенных к ней:

$$\sum_i F_i = 0, \text{ то есть } F_n - F_T - F_{сц}^n - F_{сц}^r = 0.$$

После подстановок и упрощения получим зависимость для определения скорости потока, при котором нарушается равновесие сил, приложенных к частице 1, что приводит к ее отрыву от массива грунта. Таким образом, зависимость для определения размывающей скорости грунта в подводном забое турбулентной струи имеет вид

$$U_p = \sqrt{\frac{2g}{C_n \rho_в} \left[ \frac{2}{3} (\rho_{ск} - \rho_в) d_{cp} \sin \beta \cos \gamma + \sigma_p + \sigma_{сц} \right]}. \quad (1)$$

Полученная зависимость (1) позволяет определить размывающую скорость грунта в любой точке

подводного забоя размывающей струи при различных углах наклона образующей  $\beta$  и  $\gamma$ .

Рассмотрим некоторые частные случаи для формулы (1).

1. Пусть угол наклона образующей зоны размыва  $\beta = 0^\circ$  (рис. 2, а).

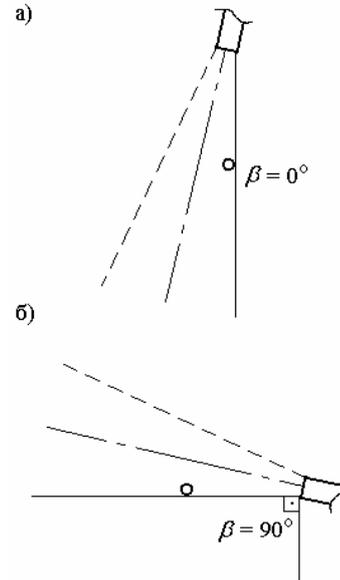


Рис. 2. Схема размыва грунта в вертикальной плоскости, проходящей через ось струи

Тогда уравнение (1) можно записать как

$$U_p^{\beta_0} = \sqrt{\frac{2g(\sigma_p + \sigma_{сц})}{C_n \rho_в}}. \quad (2)$$

Частицы удерживаются в массиве только силами сцепления, поэтому значение размывающей скорости минимальное и не зависит от  $d_{cp}$ .

2. Угол наклона образующей зоны размыва  $\beta = 90^\circ$  (рис. 2, б).

Тогда уравнение (1) для определения размывающей скорости будет иметь вид (3). При наклоне образующей зоны размыва  $\beta = 90^\circ$  и  $\gamma = 0^\circ$  (рис. 3, а) уравнение (1) примет вид (4).

В этом случае размывающая скорость примет максимальное значение.

При угле наклона образующей зоны размыва  $\beta = 90^\circ$  и  $\gamma = 90^\circ$  (рис. 3, б) зависимость (1) для определения размывающей скорости примет вид (5).

$$U_p^{\beta_0} = \sqrt{\frac{2g}{C_n \rho_в} \left[ \frac{2}{3} (\rho_{ск} - \rho_в) d_{cp} \cos \gamma + \sigma_p + \sigma_{сц} \right]}. \quad (3)$$

$$U_p^{\beta_0 \gamma_0} = \sqrt{\frac{2g}{C_n \rho_в} \left[ \frac{2}{3} (\rho_{ск} - \rho_в) d_{cp} + \sigma_p + \sigma_{сц} \right]}. \quad (4)$$

В этом случае размывающая скорость примет максимальное значение.

– при угле наклона образующей зоны размыва  $\beta = 90^\circ$  и  $\gamma = 90^\circ$  (рис. 3, б) зависимость (1) для определения размывающей скорости примет вид

$$U_p^{\beta_{90}\gamma_{90}} = U_p^{\beta_0} = \sqrt{\frac{2g(\sigma_p + \sigma_{cu})}{C_n \rho_s}} \quad (5)$$

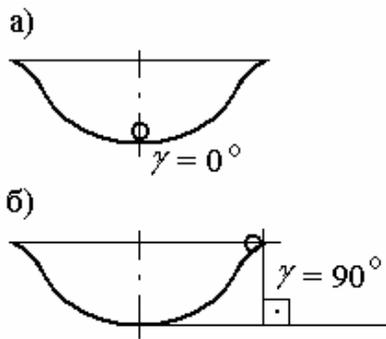


Рис. 3. Схема размыва грунта в вертикальной плоскости, перпендикулярной оси струи

Установление возможной к применению аналитической зависимости для расчета размывающей скорости на наклонной поверхности подводной зоны размыва выполнено с применением экспериментальных данных, приведенных в табл. [1].

Таблица

Значения размывающей скорости

Ф, мм	$V_p$ , м/с	Ф, мм	$V_p$ , м/с
0,1-0,25	0,56	1,0-2,5	0,54
0,25-0,5	0,43	3,0-5,0	0,77
01-1,0	0,4	5,0-7,0	0,92

Получение аналитической зависимости для расчета размывающей скорости на наклонной поверхности подводной зоны размыва возможно с учетом изложенных ранее допущений, а также следующего:

а) значение размывающей скорости на горизонтальной поверхности подводного забоя соответствуют значениям, приведенным в таблице;

б) размываемый грунт представляет собой совокупность мономинеральных частиц шарообразной формы, во взаимосвязях которых отсутствуют силы сцепления.

$$C_n = \begin{cases} 0,027 \left( \frac{d_{cp}}{d^{sp}} \right) - 0,0004 \left( \frac{d_{cp}}{d^{sp}} \right)^2 - 0,017 & \text{при } d_{cp} \leq 0,0016 \\ 0,019 \ln \left( \frac{d_{cp}}{d^{sp}} \right) + 0,085 & \text{при } d_{cp} > 0,0016 \end{cases} \quad (9)$$

Имея аналитическую зависимость для определения коэффициента подъемной силы  $C_n$  по

Таким образом, с учетом изложенных допущений, формула для определения размывающей скорости на горизонтальной поверхности подводной зоны размыва (рис. 3, а) примет следующий вид

$$U_p^{\beta_{90}\gamma_0} = \sqrt{\frac{2g}{C_n \rho_s} \left[ \frac{2}{3} (\rho_{ck} - \rho_s) d_{cp} \right]} \quad (6)$$

На вертикальной поверхности подводной зоны размыва, то есть при угле наклона образующей зоны размыва  $\beta = 90^\circ$  и  $\gamma = 90^\circ$  (рис. 3, б) размывающая скорость в соответствии с формулой (5) примет значение равное нулю

$$U_p^{\beta_{90}\gamma_{90}} = U_p^{\beta_0} = 0 \quad (7)$$

Анализ приведенных зависимостей показывает возможность установления значения коэффициента подъемной силы  $C_n$ , при этом значения размывающей скорости принимаются на основании полученных ранее экспериментальных данных.

Экспериментальные значения коэффициента подъемной силы  $C_n$  определим с применением зависимости, полученной из (6)

$$U_p^{\beta_{90}\gamma_0} = U_p^{\text{эксн}}, \quad C_n = \frac{2g}{(U_p^{\text{эксн}})^2 \rho_s} \left[ \frac{2}{3} (\rho_{ck} - \rho_s) d_{cp} \right] \quad (8)$$

Экспериментальная кривая коэффициента подъемной силы  $C_n$  отмеченная на рис. 4, поз. 1, при достоверности аппроксимации  $R^2 = 0,99$  подчиняется аналитической зависимости (9). График аналитической зависимости коэффициента подъемной силы  $C_n$  приведен на рис. 4 под поз. 2.

В аналитической зависимости (9) значение граничной крупности частиц грунта принято  $d^{sp} = 0,00016$  м. Такое значение граничной крупности принято на основании данных нормативной документации качества природных и искусственных (техногенных) песков [2], в соответствии с которыми частицы крупностью менее 0,00016 м (160 мкм) считаются мелкодисперсными и количество их в товарном продукте ограничивается.

формуле (1) определим значение размывающей скорости  $U_p$  в любой точке подводного забоя

турбулентної розмиваючої струї, при кутах нахилу  $\beta$  і  $\gamma$ . Графік отриманої залежності розмиваючої швидкості  $U_p$  від середньої крупності частинок розмиваемого ґрунту  $d_{cp}$  показує, що

характер кривої розмиваючої швидкості в залежності від кута нахилу образуючої не змінюється. В результаті утворюється сімейство кривих (рис. 5).

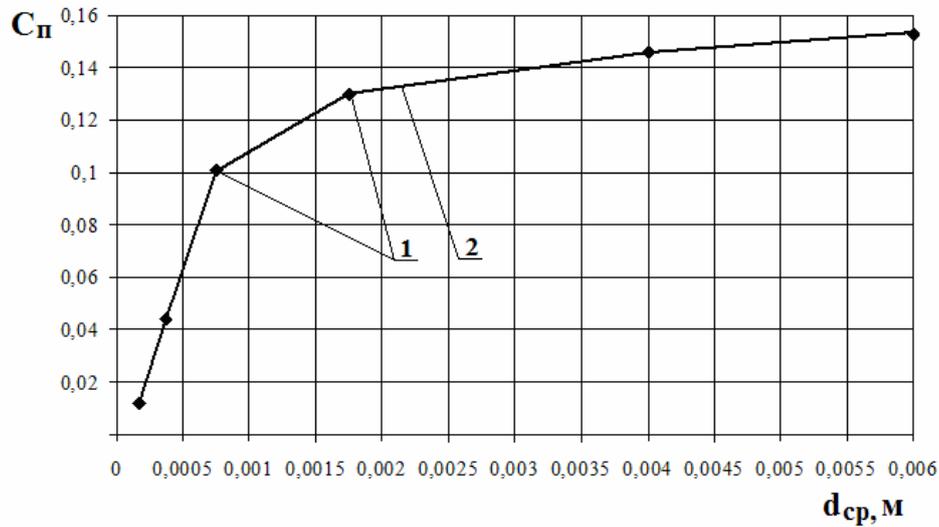


Рис. 4. Залежність коефіцієнта підйомної сили від середньої крупності частинок розмиваемого ґрунту: 1 – експериментальні дані; 2 – теоретична залежність

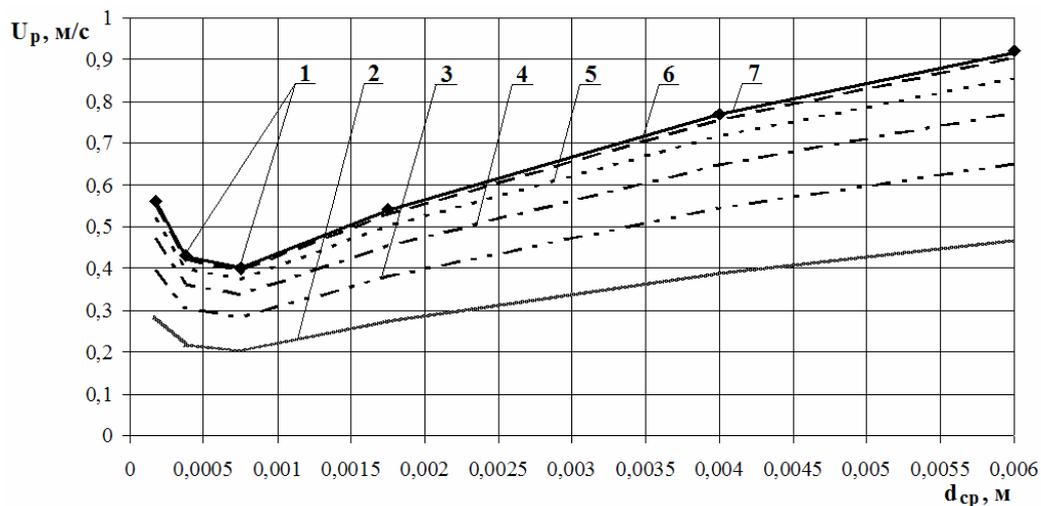


Рис. 5. Залежність розмиваючої швидкості від середньої крупності частинок ґрунту при  $\gamma = 0^\circ$ : 1 – експериментальні дані при  $\beta = 90^\circ$ ; 2 – теоретична залежність при  $\beta = 15^\circ$ ; 3 – теоретична залежність при  $\beta = 30^\circ$ ; 4 – теоретична залежність при  $\beta = 45^\circ$ ; 5 – теоретична залежність при  $\beta = 60^\circ$ ; 6 – теоретична залежність при  $\beta = 75^\circ$ ; 7 – теоретична залежність при  $\beta = 90^\circ$

### Список літератури

1. Рошупкин Д.В. Разработка ґрунтов землесосными снарядами. – М.: Транспорт, 1969. – 135 с.

2. ДСТУ 2.7-32-95. Пісок щільний, придатний для будівельних матеріалів, конструкцій та робіт. Технічні умови.

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.П. Франчуком 07.01.10