

УДК 551.435.627+622.271.451.4

## ФОРМИРОВАНИЕ УГЛА ОТКОСА НЕСВЯЗНОГО ГРУНТА В ДВУМЕРНОМ СЛУЧАЕ

И. Н. Горбань, А. С. Котельникова<sup>†</sup>, **В. И. Никишов**, Г. П. Соколовский

*Институт гидромеханики НАН Украины,  
ул. Желябова, 8/4, 03057, Киев, Украина*

<sup>†</sup>*E-mail: [kan5nas@gmail.com](mailto:kan5nas@gmail.com)*

*Получено 21.11.2017*

Уменьшение рисков, связанных с оползевыми процессами, обвалами и другими негативными последствиями интенсивного строительства в прибрежной зоне, а также неконтролируемого забора воды и песка, невозможно без понимания физики разрушения гранулированной среды. Вместе с тем, количественные характеристики процессов такого рода остаются на сегодняшний день недостаточно изученными. Исходя из этого, в статье представлены результаты модельных экспериментальных исследований, связанных с формированием угла откоса несвязного грунта в двумерном случае. Рассмотрен процесс образования угла откоса при разрушении гранулированной колонны в воздухе и воде, а также при донном размыве. Установлено, что во всех случаях углы, сформированные в процессе разрушения гранулированной колонны, близки к углу естественного откоса для данного типа грунта. При этом форма профиля отложения зависит практически только от коэффициента пропорциональности, определяемого как отношение начальной высоты к горизонтальному размеру колонны. Показано, что формирование углов откосов связано с процессом размыва донной поверхности. Обнаружено, что при образовании воронки размыва треугольного профиля с крутыми склонами, независимо от интенсивности всасывания частичек грунта и коэффициента пропорциональности, угол наклона образующих внутренней поверхности воронки размыва к горизонту равен углу, сформированному разрушениями песчаной колонны в воде. Полученные данные могут быть полезными для прогнозирования предельного угла откоса при разработке русловых карьеров для добычи песка, поскольку форма продольного профиля склона обуславливает характер, ход и соотношение процессов эрозии и аккумуляции.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *гранулированный поток, несвязанные грунты, песчаная колонна, обрушение, угол естественного откоса, воронка размыва, коэффициент пропорциональности*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Постоянный рост количества быстроходных транспортных судов, осуществляющих перевозки людей и грузов на реках и в каналах, интенсивное строительство в прибрежной зоне, неконтролируемый забор воды и песка могут приводить к сдвигам грунта и разрушению берегов, прорыву дамб и размыву мостовых опор. Предотвращение аварийных ситуаций и уменьшение рисков, связанных с оползневыми процессами, обвалами, а также другими негативными последствиями, невозможно без понимания физики разрушения гранулированной среды.

Гранулированным потокам посвящено достаточно большое количество работ, в которых исследовано разрушение гранулированной колонны в осесимметричном [1–3] и двумерных случаях [2–8]. При этом в качестве гранулированного материала использовались песок [1, 3, 6, 8, 9], стеклянные бусинки [2, 5–7], пенопластовые шарики [6] или даже соль, кускус, сахар и рис [1, 4].

На качественном уровне процесс разрушения гранулированных колонн демонстрирует сильную зависимость поведения потока от значения начального коэффициента пропорциональности [1–5]. Однако, как следует из наблюдений [7], при разрушении колонны в вязкой жидкости в случаях изначально неплотной и плотной укладок гранулированного материала форма отложения в основном определяется исходным относительным объемом материала и слабо меняется в зависимости от начального коэффициента пропорциональности колонны.

Наряду с экспериментальными результатами, в работах [8, 9] представлены результаты численного моделирования сухих гранулированных потоков, вызванных разрушением дамб (плотин). Авторами использовалась численная модель, разработанная для переноса наносов в неустановившихся потоках. Сравнение численных результатов с экспериментальными данными показало достаточно хорошее согласование при воспроизведении профилей свободной поверхности отложений.

Численное исследование гранулированного потока проводилось также в работах [10–13]. Для лучшего описания динамики гранулированных обвалов на шероховатом основании в [10] предложена двухслойная осредненная по глубине модель. При этом поток считался состоящим из двух текущих слоев, резко разделенных нематериальной поверхностью, через которую допускается обмен массой. Моделирование процесса обвалов показало, что такое приближение дает более точное описание распределения скорости потока, чем классическая однослойная модель.

Разрушение и распространение двумерных колонн на горизонтальной плоскости с использованием метода контактной динамики, позволяющего детально анализировать динамику разрушения с учетом энергии и траектории индивидуальных частиц, количественно исследовалась в [11]. В результате была получена степенная зависимость нормализованного горизонтального размера конечного отложения от начального коэффициента пропорциональности колонны для высоких коэффициентов пропорциональности и линейная для низких их значений.

Приложение негладкой контактной динамики к описанию гранулированного потока представлено в [12]. Разработана новая модель сопротивления качению, которая может моделировать несферические частицы. Сравнение полученных на ее основе оценок с доступными экспериментами разрушения осесимметричных гранулированных колонн

показали применимость подхода к моделированию оползней потоков обломков.

Численное исследование двумерного гравитационного разрушения прямоугольных гранулированных груд в воздухе проводилось в [13], где фрикционное поведение материала задавалось с помощью модели фон Мизеса с Мор-Кулоновской поверхностью текучести. Представлены результаты, описывающие развитие поля скоростей и формы оползня для двух песчаных груд разных начальных форм. Проведено сравнение конечных профилей свободной поверхности для каждого из двух случаев с доступными экспериментальными данными.

Следует отметить, что, несмотря на растущее число исследований, посвященных динамике оползней и гранулированных потоков, количественные характеристики экспериментальных и естественных физических процессов такого рода остаются недостаточно изученными. Исходя из этого, в данной статье представлены результаты экспериментальных исследований разрушения гранулированной колонны и образования воронки размыва в прямоугольном канале.

## 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В гидродинамическом лотке, предназначенном для исследований процессов транспорта наносов, с помощью водонепроницаемых перегородок выделена область размерами  $0.85 \times 0.17 \times 0.22$  м. Дно и стенки лотка изготовлены из плексигласа толщиной 10 мм. На прозрачной боковой стенке нанесена сетка с шагом 3 см по горизонтали и 2 см по вертикали. Схема экспериментальной установки с площадкой для моделирования представлена на Рис. 1.

Методика проведения экспериментов состояла в следующем. Внутри выделенной области на расстоянии 21 см от торцевой стенки устанавливалась выдвижная перегородка 2, разделяющая ее на два отделения. Песок засыпался в левую часть емкости 3 при опущенной перегородке, что обеспечивало формирование колонны длиной  $L_i$  с прямоугольным сечением, имеющим высоту  $H_i$  и ширину  $B$ . Затем перегородка поднималась вертикально, инициируя поток гранулированного материала (разрушение колонны в канале с прямоугольным поперечным сечением). В конечном итоге образовывалась поверхность свободного откоса с углом  $\alpha$  к горизонтальной плоскости, который является углом естественного откоса. Его величина определялась по тангенсу угла наклона откоса  $\operatorname{tg} \alpha = h/l$ , где  $h$  — конечная высота откоса;  $l$  — заложение откоса (горизонтальный размер конечного отложения).

В экспериментах использовались предварительно просеянные через сито фракции песка с частичками калибра 0.5, 0.3 и 0.05 мм, т.е. рассматривался крупнозернистый, среднезернистый и пылеватый песок. Коэффициент пропорциональности, определенный как отношение начальной высоты к горизонтальному размеру колонны  $a = H_i/L_i$  ( $L_i = \text{const}$ ), находился в диапазоне  $0.57 \leq a \leq 1.02$ .

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 3.1. Двумерное разрушение песчаной колонны в воздухе

Процесс разрушения песчаной колонны в воздухе в виде последовательных фотографий показан на Рис. 2. Опишем вкратце основные его черты.

Движение песка начинается одновременно с поднятием перегородки. Как отмечено

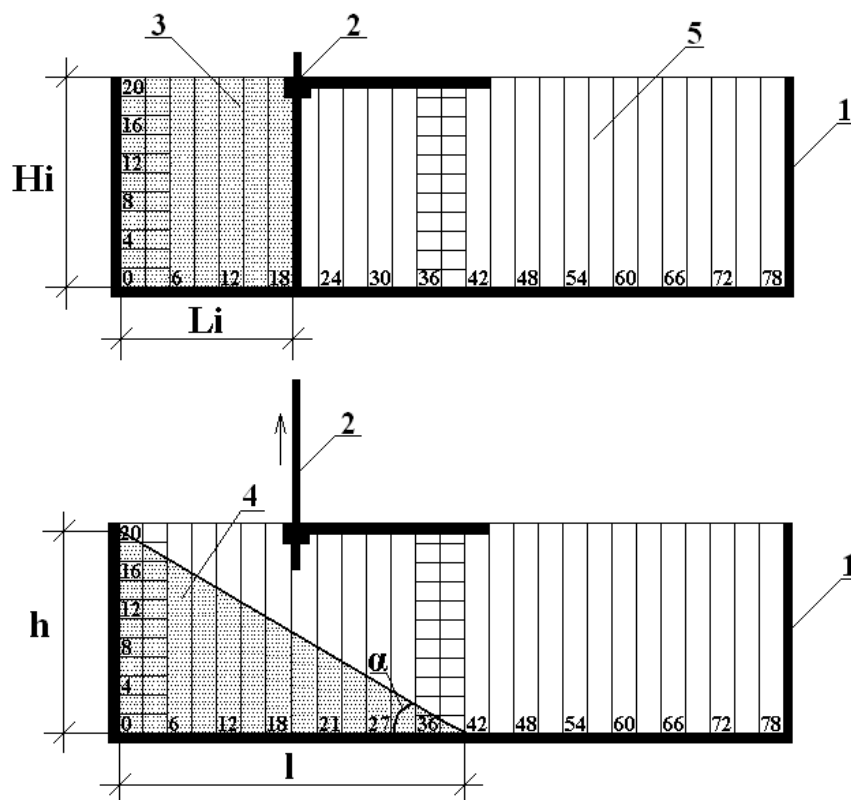


Рис. 1. Схематическое изображение экспериментальной установки:

- 1 – резервуар (область моделирования), 2 – выдвижная перегородка, 3 – малое отделение для песка, 4 – песок, 5 – большое отделение

в [1, 4], поток начинается с расплывающейся стадии, в которой верхний торец колонны остается горизонтальным и падает вертикально на нижние слои, которые текут наружу (см. кадры 2 и 3). Затем частички песка начинают перемещаться вниз внешней поверхности отложения в движущийся слой, который постепенно становится все более тонким по мере того, как течение замедляется (кадр 4). Конечная стадия обвала характеризуется “образованием лавины”, где меньшие области отложения текут индивидуально (кадр 5). Именно на этом этапе могут формироваться некоторые модификации конфигурации конечного отложения [1].

Из кадра 6 на Рис. 2 можно заключить, что профиль конечного отложения при  $a = 0.76$  имеет форму прямоугольной трапеции со слегка скругленным углом в верхней части. За счет того, что дно канала гладкое, формируется также незначительная вогнутость наклонной поверхности. Подобные результаты получены в исследованиях [3, 6], согласно которым отложение имеет форму прямоугольной трапеции при коэффициенте пропорциональности ( $a < 1.05$ ). При высоком коэффициенте пропорциональности ( $a > 1.05$ ) отложение приобретает близкий к треугольному профиль, причем отношение его конечной высоты  $h$  к начальной высоте колонны  $H_i$  уменьшается.

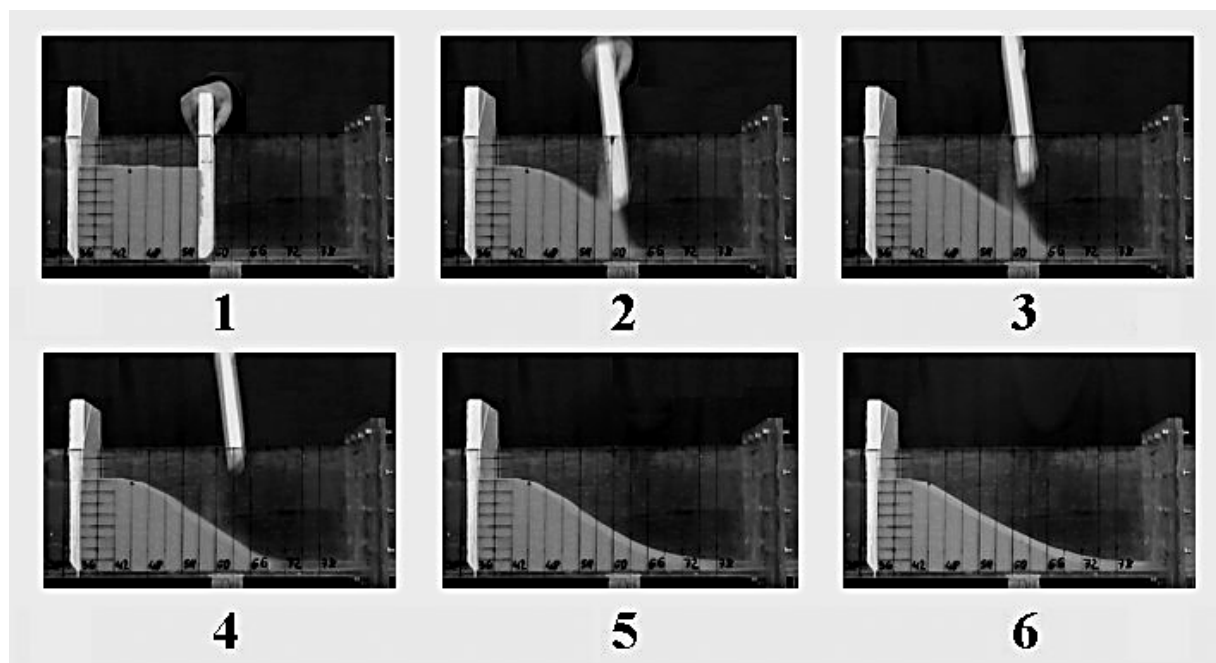


Рис. 2. Разрушение песчаной колонны в воздухе (коэффициент пропорциональности  $a = 0.76$ )

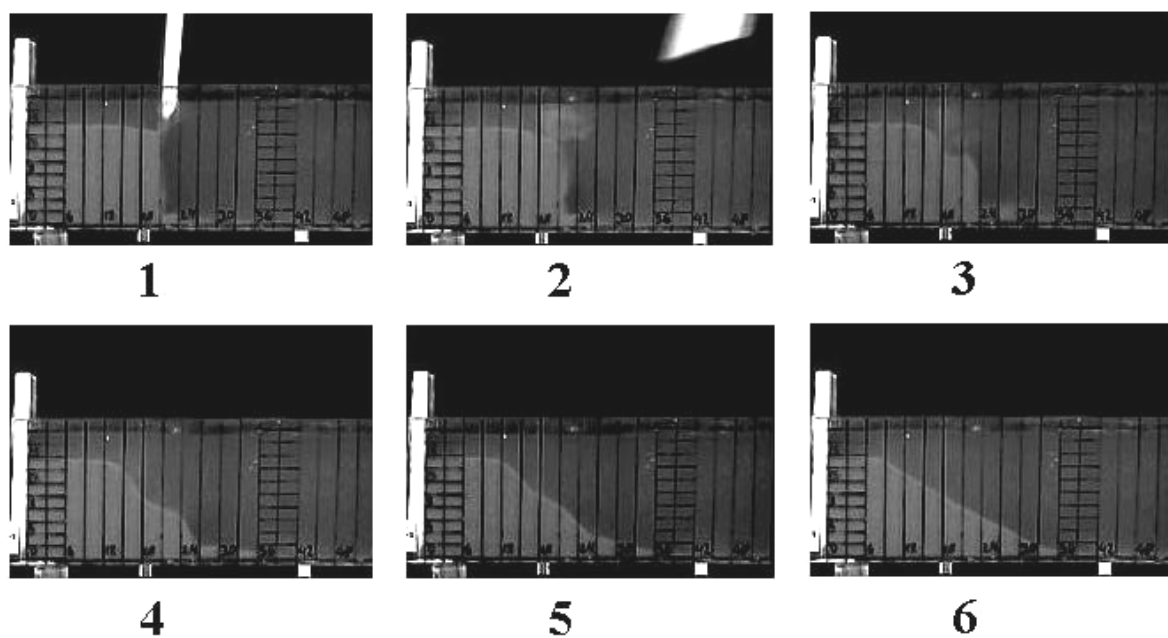


Рис. 3. Разрушение песчаной колонны в воде (коэффициент пропорциональности  $a = 0.76$ )

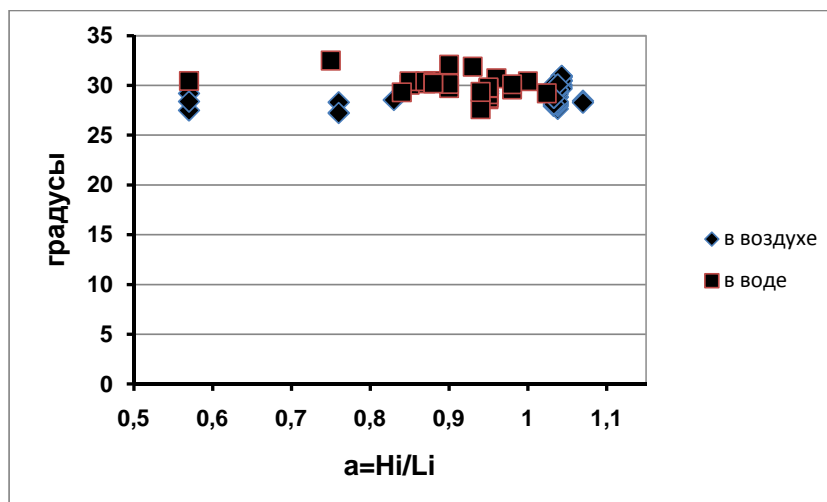


Рис. 4. Величина угла откоса, сформированного в результате разрушения гранулированной колонны в воздухе и в воде

### 3.2. Двумерное разрушение песчаной колонны в воде

Процесс разрушения песчаной колонны в воде несколько отличается от ее разрушения в воздухе. Известно, что свойства всех разновидностей грунтов, особенно песчаных, пылеватых и глинистых, существенным образом зависят от состава и содержания в них воды. Вода оказывает взвешивающее действие на слагающие склон породы. Насыщая грунты, она изменяет их физико-механические характеристики, уменьшая величину сопротивления сдвигу [14].

Для проведения опытов с песком в подводном состоянии свободное от песка отделение лотка 5 заполнялось водой. Затем выдвижная перегородка поднималась на несколько миллиметров, чтобы вода могла проникнуть в малое отделение, заполненное песком. После насыщения песка водой, о чем свидетельствовало изменение его цвета, повторялись опыты по схеме, описанной в предыдущем разделе. Начальные уровни жидкости в малом и большом отделениях резервуара были одинаковы. Типичный процесс разрушения колонны в воде иллюстрируется последовательным рядом фотографий, представленным на Рис. 3.

Следует отметить, что в данном случае разрушение колонны происходит не сразу (см. кадр 1). После поднятия перегородки верхняя часть колонны отделяется как блок и падает, расширяясь в горизонтальном направлении (кадры 2 и 3). Затем ее передний фронт медленно размывается, формируя поток, который распространяется вдоль донной поверхности резервуара (кадры 4 и 5). В конечном итоге отложение приобретает трапециевидную форму (кадр 6).

В обоих случаях, после того как профиль отложения достигал устойчивого состояния (состояния покоя), измерялись основные параметры — высота  $h$  и горизонтальный размер  $l$  конечного отложения, после чего определялся угол откоса  $\alpha$ . Результаты исследований показали, что величины углов, сформированных разрушениями песчаной колонны в сухом и водонасыщенном состояниях (т.е. в воздухе и в воде соответственно), отличаются мало и находятся в диапазоне от 27 до 32° (Рис. 4). Следует отметить,

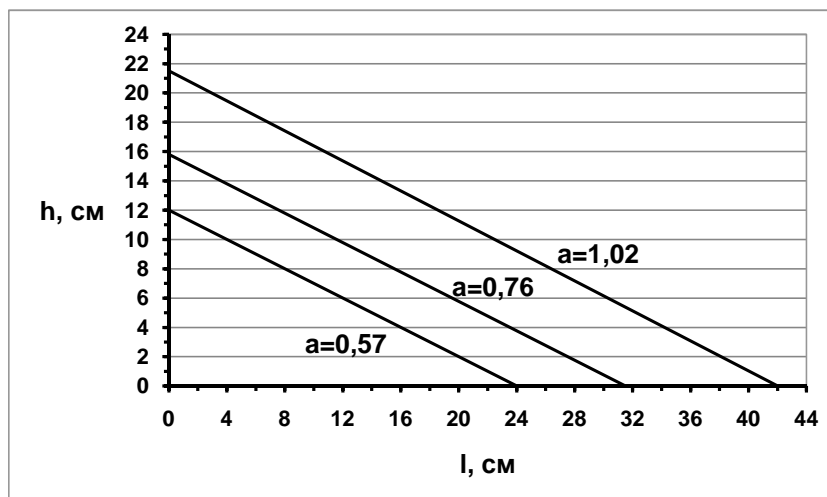


Рис. 5. Зависимость горизонтального размера конечного отложения  $l$  от его конечной высоты  $h$  для среднезернистого песка в водонасыщенном состоянии

что на графике представлены результаты, полученные для разных фракций песка. Таким образом, можно утверждать, что угол, измеренный у подножия конечного отложения, соответствует углу естественного откоса для рассматриваемого гранулированного материала (в данном случае, песка). При этом угол откоса слабо зависит от размера частичек.

Анализ полученных результатов также показал, что угол, сформированный двумерными разрушениями, не зависит от высоты откоса. В качестве примера на Рис. 5 показана зависимость горизонтального размера конечного отложения  $l$  от конечной высоты отложения  $h$  для среднезернистого песка в водонасыщенном состоянии для коэффициентов пропорциональности 0.57, 0.76 и 1.02. Из графика видно, что линии практически параллельны между собой, т.е. угол естественного откоса слабо меняется с изменением его высоты. Аналогичная картина наблюдается для песка другой крупности и сухого песка. Отметим, что согласно результатам, представленным в работе [3] параметры конечного отложения  $h$  и  $l$  в совокупности с коэффициентом пропорциональности практически одинаковы как для насыщенного, так и для сухого песка. Таким образом, несмотря на довольно сильные отличия процессов разрушения гранулированной колонны в воздухе и в воде, влияние вязких эффектов в основной части потока такого материала незначительно.

### 3.3. Формирование воронки размыва

Течение гранулированного материала главным образом связано и с забором песка в ходе дноуглубительных работ или при разработке русловых карьеров. При размыве донной поверхности движение частичек грунта имеет совсем другой характер. Поэтому процесс формирования углов склонов в таких условиях представляет особый интерес.

Согласно [15], забор песка ниже исходного основания будет приводить к нарушению его устойчивого состояния и формированию крутого склона в передней части устья всасывания. Из-за неустойчивости склон будет распространяться от устья всасывания,

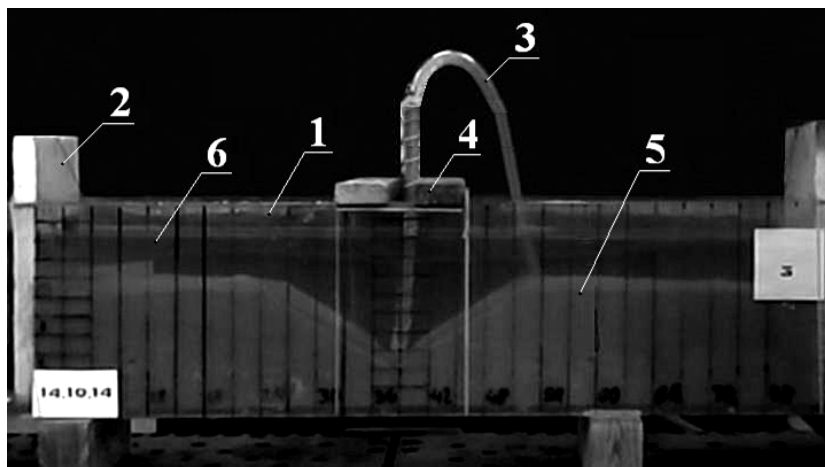


Рис. 6. Фотография воронки размыва:

1 — лоток, 2 — водонепроницаемые перегородки, 3 — всасывающая трубка,  
4 — направляющие, 5 — песок, 6 — вода

создавая текущую в него песчано-водную смесь. При этом крутизна и скорость распространения склона определяется объемом добычи песка.

В данной работе образование донного углубления проводилось так называемым землесосным способом размыва грунта. Качественно он приближается к эрозионному размыву и на сегодняшний день является самым простым способом добычи песка из русел рек. При этом под водой вблизи поверхности разрабатываемого грунта располагается приемное отверстие всасывающей трубы землесоса и создаются условия, обеспечивающие всасывание частиц грунта в трубу вместе с водой [?]. Как результат вокруг трубы формируется углубление — воронка всасывания или воронка размыва. При всасывании твердых частиц со дна увеличивается глубина воронки, а в результате скатывания твердых частиц с боковых поверхностей увеличивается ее диаметр. Процесс формирования считается закончившимся тогда, когда при некотором постоянном объемном расходе глубина воронки и ее радиус не увеличиваются, а форма воронки размыва стабилизируется.

При проведении экспериментов в гидродинамическом лотке высота насыпного дна составляла (10...12) см по всей длине рассматриваемой области. Слой наносов на дне состоял из песка с размером фракций (0.3...0.32) мм. Уровень воды в канале поддерживался постоянным.

В качестве всасывающей трубы использовались полиэтиленовые трубки диаметром 6, 8, 10 и 12 см. Для получения симметричного профиля углубления всасывающая трубка 3 двигалась по ширине лотка вдоль направляющих 4, установленных на бортах лотка (см. Рис. 5). Формирование воронки размыва заканчивалось при достижении некоторой заданной ее глубины. Рассматривались разные профили донных углублений в зависимости от глубины  $h$  и ширины  $b$ . Угол откоса определялся посредством измерения тангенса угла откоса  $\operatorname{tg} \alpha = h/(b/2)$ . Фотография типичной воронки размыва представлена на Рис. 6, из которой видно, что использование описанного метода размыва донной поверхности приводит к формированию воронки треугольного профиля с крутыми склонами.



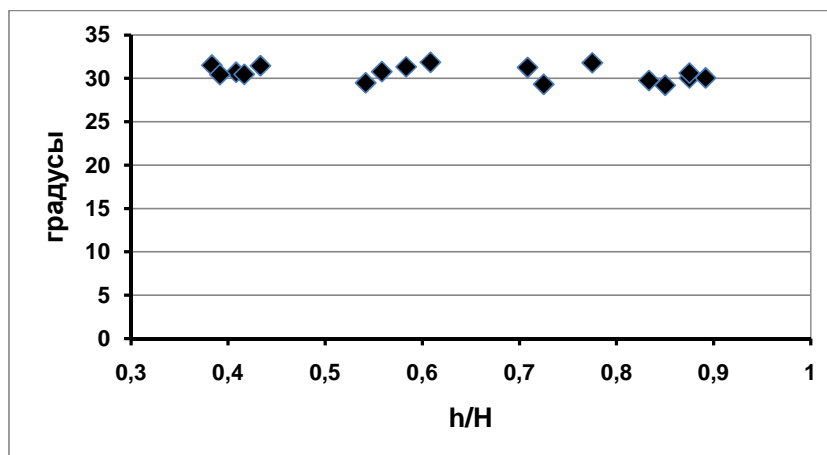


Рис. 7. Величина угла откоса, сформированного в результате всасывания частиц грунта со дна канала:

$h$  — глубина воронки размыва,  $H$  — высота песка в канале

Детальный анализ параметров конечного профиля донных углублений показал, что, независимо от объема извлеченного грунта, коэффициент пропорциональности меняется слабо, а отношение глубины воронки размыва  $h$  к ее половинной ширине  $b/2$  составляет порядка (0.58... 0.62). Следовательно, угол наклона образующих внутренней поверхности воронки размыва к горизонту (угол откоса), сформированный всасыванием частиц грунта со дна канала, равен примерно  $(30... 32)^\circ$ , что соответствует углу откоса, сформированного разрушением песчаной колонны в воде. График зависимости величины угла откоса от относительной глубины воронки размыва представлен на Рис. 7.

Таким образом, можно сделать вывод, что угол откоса, сформированный в процессе разрушения водонасыщенной колонны и в процессе образования донного углубления (воронки размыва), не зависит от коэффициентов пропорциональности и соответствует углу естественного откоса под водой. Это наблюдение справедливо при относительно малой скорости добычи песка, когда гранулированный поток на склоне является ламинарным (т.е. при маломасштабных испытаниях). Если объем добычи увеличивается, гранулированный поток становится турбулентным, а угол склона уменьшается [15]. На скорость добычи песка, в свою очередь, влияет положение всаса по отношению к плоскости грунта — чем ближе расположено его устье, тем интенсивнее всасывание. Заглубление же всаса в рыхлый грунт приводит к повышению процентного содержания твердых частиц в гидросмеси. Очевидно также, что увеличение диаметра всасывающей трубы способствует увеличению расхода жидкости, автоматически приводя к интенсификации всасывания. Другими словами, чем больше диаметр всасывающей трубы, тем быстрее образуется воронка размыва, что и наблюдалось в наших исследованиях. Заметим, что при этом угол откоса менялся слабо.

В заключение необходимо отметить следующее. Несмотря на то, что заложение откосов выемок, подлежащих разработке плавучими землесосными снарядами, проектируется с учетом угла естественного откоса грунта, для уменьшения рисков, связанных с негативными последствиями добычи донного материала (обрушениями и оползнями),

необходимо придерживаться допустимых норм, регламентирующих проведение гидротехнических работ [16].

#### 4. ВЫВОДЫ

Представлены результаты экспериментальных исследований, связанных с формированием угла откоса несвязного грунта (песка) в двумерном случае. Рассмотрен процесс образования угла откоса при разрушении гранулированной колонны в воздухе и воде, а также при донном размыве. Анализ полученных данных показал, что, хотя разрушение гранулированных колонн в сухом и водонасыщенном состоянии происходит по разным сценариям, соотношение сторон конечного отложения и коэффициент пропорциональности остаются практически одинаковыми. Из этого следует, что углы, сформированные в процессе разрушения гранулированной колонны для двух указанных случаев, мало отличаются друг от друга и соответствуют углу естественного откоса для данного типа грунта. Отмечено, что форма профиля отложения существенно зависит от коэффициента пропорциональности  $a$ , тогда как крупность песка слабо влияет на конечный результат.

Кроме того, показано, что формирование углов откосов связано с процессом размыва донной поверхности. Описан процесс образования воронки размыва треугольного профиля с крутыми склонами. Обнаружено, что, независимо от интенсивности всасывания частичек грунта и коэффициента пропорциональности, угол наклона образующих внутренней поверхности воронки размыва к горизонту равен углу, сформированному разрушениями песчаной колонны в воде.

Таким образом, можно утверждать, что, несмотря на довольно разный характер движения гранулированного материала, в процессе разрушения водонасыщенной колонны и образования воронки размыва, происходит формирование угла откоса, который не зависит от коэффициента пропорциональности и соответствует углу естественного откоса рассматриваемого грунта в воде.

Полученные данные могут быть полезными для прогнозирования предельного угла откоса сыпучих грунтов (например, при разработке русловых карьеров для добычи песка), поскольку форма продольного профиля склона обуславливает характер, ход и соотношение процессов эрозии и аккумуляции.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Axisymmetric collapse of granular columns / G. Lube, H. E. Huppert, R. S. J. Sparks, M. A. Hallworth // *Journal of Fluid Mechanics*. — 2004. — Vol. 508. — P. 175–199.
- [2] Lajeunesse E., Mangeney-Castelnau A., Vilotte J. P. Spreading of a granular mass on an horizontal plane // *Physics of Fluids*. — 2004. — Vol. 16, no. 7. — P. 2371–2381.
- [3] Thompson E. L., Huppert H. E. Granular column collapses: Further experimental results // *Journal of Fluid Mechanics*. — 2007. — Vol. 575. — P. 177–186.
- [4] Collapses of two-dimensions granular columns / G. Lube, H. E. Huppert, R. S. J. Sparks, A. Freundt // *Physical Review E*. — 2005. — Vol. 72, no. 041301. — P. 1–10.

- [5] Lajeunesse E., Monnier J. B., Homsy G. Granular slumping on an horizontal surface // *Physics of Fluids*. — 2005. — Vol. 17, no. 103302. — P. 1–17.
- [6] Balmforth N. J., Kerswell R. R. Granular collapse in two dimensions // *Journal of Fluid Mechanics*. — 2005. — Vol. 538. — P. 399–428.
- [7] Rondon L., Pouliquen O., Aussillous P. Granular collapse in a fluid: Role of the initial volume fraction // *Physics of Fluids*. — 2011. — Vol. 23, no. 073301. — P. 1–7.
- [8] Dam-break dry granular flows: Experimental and numerical analysis / S. Evangelista, G. De Marinis, C. Di Cristo, A. Leopardi // *WSEAS Transactions on Environment and Development*. — 2014. — Vol. 10, no. 41. — P. 382–392.
- [9] Cristo C. D., Leopardi A., Greco M. Modeling dam break granular flows // *Proceedings of the International Conference River Flow 2010*. — Karlsruhe, Germany : Bundesanstalt für Wasserbau, 2010. — P. 895–901.
- [10] A two-layer depth-averaged models of dry granular material for dam-break flows / L. Sarno, A. Carravetta, R. Martino et al. // *Latest Trends in Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology: Proceedings of the 7th International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (EMESEG'14)*. — WSEAS, 2014. — P. 118–127.
- [11] Staron L., Hinch E. J. Study of the collapse of granular columns using two-dimensional discrete-grain simulation // *Journal of Fluid Mechanics*. — 2005. — Vol. 545. — P. 1–27.
- [12] Simulating granular column collapse by non-smooth contact dynamics / J. Huang, K. Krabbenhoft, M. Vicente da Silva, A. V. Lyamin // *Blucher Mechanical Engineering Proceedings*. — 2014. — Vol. 1, no. 1. — P. 1541–1547.
- [13] Babaei M. H., Dabros T., Savage S. B. Gravitational collapse of rectangular granular piles // *COMSOL Conference*. — Boston, USA, 2014.
- [14] Пьянков С. А., Азизов З. К. *Механика грунтов: учебное пособие*. — Ульяновск : УлГТУ, 2008.
- [15] van Rhee C., Bezuijen A. The breacing of sand investigated in large scale model tests // *26th International Conference on Coastal Engineering*. — ASCE, 1998. — P. 2509–2519.
- [16] ВСН 34-91. *Правила производства и приемки работ на строительстве, реконструкции и расширении действующих гидротехнических морских и речных транспортных сооружений. Часть 1*, Министерство транспортного строительства СССР. — Москва, 1992.

## REFERENCES

- [1] G. Lube, H. E. Huppert, R. S. J. Sparks, and M. A. Hallworth, “Axisymmetric collapse of granular columns,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 508, pp. 175–199, 2004.
- [2] E. Lajeunesse, A. Mangeney-Castelnau, and J. P. Vilotte, “Spreading of a granular mass on an horizontal plane,” *Physics of Fluids*, vol. 16, no. 7, pp. 2371–2381, 2004.
- [3] E. L. Thompson and H. E. Huppert, “Granular column collapses: Further experimental results,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 575, pp. 177–186, 2007.
- [4] G. Lube, H. E. Huppert, R. S. J. Sparks, and A. Freundt, “Collapses of two-dimensions granular columns,” *Physical Review E*, vol. 72, no. 041301, pp. 1–10, 2005.
- [5] E. Lajeunesse, J. B. Monnier, and G. Homsy, “Granular slumping on an horizontal surface,” *Physics of Fluids*, vol. 17, no. 103302, pp. 1–17, 2005.
- [6] N. J. Balmforth and R. R. Kerswell, “Granular collapse in two dimensions,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 538, pp. 399–428, 2005.
- [7] L. Rondon, O. Pouliquen, and P. Aussillous, “Granular collapse in a fluid: Role of the initial volume fraction,” *Physics of Fluids*, vol. 23, no. 073301, pp. 1–7, 2011.
- [8] S. Evangelista, G. D. Marinis, C. D. Cristo, and A. Leopardi, “Dam-break dry granular flows: Experimental and numerical analysis,” *WSEAS Transactions on Environment and Development*, vol. 10, no. 41, pp. 382–392, 2014.
- [9] C. D. Cristo, A. Leopardi, and M. Greco, “Modeling dam break granular flows,” in *Proceedings of the International Conference River Flow 2010*, (Karlsruhe, Germany), pp. 895–901, Bundesanstalt für Wasserbau, 2010.
- [10] L. Sarno, A. Carravetta, R. Martino, Y. C. Tai, and M. N. Papa, “A two-layer depth-averaged models of dry granular material for dam-break flows,” in *Latest Trends in Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology: Proceedings of the 7th International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (EMESEG'14)*, pp. 118–127, WSEAS, 2014.
- [11] L. Staron and E. J. Hinch, “Study of the collapse of granular columns using two-dimensional discrete-grain simulation,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 545, pp. 1–27, 2005.
- [12] J. Huang, K. Krabbenhoft, M. V. da Silva, and A. V. Lyamin, “Simulating granular column collapse by non-smooth contact dynamics,” *Blucher Mechanical Engineering Proceedings*, vol. 1, no. 1, pp. 1541–1547, 2014.
- [13] M. H. Babaei, T. Dabros, and S. B. Savage, “Gravitational collapse of rectangular granular piles,” in *COMSOL Conference*, (Boston, USA), 2014.
- [14] S. A. Pyankov and Z. K. Azizov, *Soil mechanics: Study guide*. Ulyanovsk: UISTU, 2008.

- [15] C. van Rhee and A. Bezuijen, “The breacing of sand investigated in large scale model tests,” in *26th International Conference on Coastal Engineering*, pp. 2509–2519, ASCE, 1998.
- [16] “Departmental norms 34-91. Rules for the production and acceptance of work on the construction, reconstruction and expansion of existing hydrotechnical sea and river transport facilities. Part 1,” 1992.

***I. М. Горбань, А. С. Котельнікова, В. І. Нікішов, Г. П. Соколовський***  
**Формування кута укосу незв’язного ґрунту в двовимірному випадку**

Зменшення ризиків, пов’язаних зі зсувними процесами, обвалами й іншими негативними наслідками інтенсивного будівництва в прибережній зоні, а також неконтрольованого забору води й піску, неможливо без розуміння фізики руйнування гранульованого середовища. Разом з тим, кількісні характеристики процесів такого роду залишаються наразі недостатньо вивченими. Виходячи з цього, у статті представлено результати модельних експериментальних досліджень, пов’язаних з формуванням кута укосу незв’язного ґрунту в двовимірному випадку. Розглянуто процес утворення кута укосу при руйнуванні гранульованої колони в повітрі та воді, а також при донному розмиві. Встановлено, що у всіх випадках кути, сформовані в процесі руйнування гранульованої колони, близькі до кута природного укосу для даного типу ґрунту. При цьому форма профілю відкладення залежить практично лише від коефіцієнта пропорційності, що визначається як відношення початкової висоти до горизонтального розміру колони. Показано, що формування кутів укосів пов’язано з процесом розмиву донної поверхні. Виявлено, що при утворенні воронки розмиву трикутного профілю з крутими схилами, незалежно від інтенсивності всмоктування частинок ґрунту й коефіцієнта пропорційності, кут нахилу твірних внутрішньої поверхні воронки розмиву до горизонту дорівнює куту, сформованому руйнуванням піщаної колони у воді. Отримані дані можуть бути корисними для прогнозування граничного кута укосу при розробці руслових кар’єрів для добування піску, оскільки форма поздовжнього профілю схилу обумовлює характер, хід і співвідношення процесів ерозії й акумуляції.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** *гранульований потік, незв’язні ґрунти, піщана колона, обвал, кут природного укосу, воронка розмиву, коефіцієнт пропорційності*

***I. N. Gorban, A. S. Kotelnikova, V. I. Nikishov, G. P. Sokolovsky***  
**Formation of the slope angle of the cohesionless soil**  
**in a two-dimensional case**

It is impossible to reduce the risks associated with landslide processes, collapses and other negative consequences of intensive construction in the coastal zone, as well as the uncontrolled collection of water and sand without understanding the physics of the destruction of granular media. At the same time, the quantitative characteristics of such processes remain understudied. For this reason, the paper presents the results of the model experimental studies related to the formation of the inclination angle of the cohesionless soil in the two-dimensional case. The process of formation of the repose angle in the destruction of a granular column in air and water, as well as at bottom erosion is considered. In all cases the angles formed during the destruction

of the granular column are found to be close to the natural angle of repose for this type of soil. In this case, the form of the deposit profile depends practically only on the coefficient of proportionality, which is defined as the ratio of the initial height to the horizontal size of the column. It is shown that the formation of the repose angles is associated with the process of the bottom surface erosion. In the formation of the erosion crater of a triangular profile with steep slopes, irrespective of the intensity of absorption of soil particles and the coefficient of proportionality, the angle of inclination of generatrix of the crater's intrinsic surface to the horizon is found to be equal to the angle formed by sand column destruction in water. The obtained data may be useful for predicting the limiting angle of repose in the development of channel quarries for sand extraction, since the shape of the longitudinal profile of the slope determines the nature, course and correlation of the processes of erosion and accumulation.

*KEY WORDS: granular flow, cohesionless soils, sand column, collapse, natural angle of repose, erosion pool, coefficient of proportionality*