



## О МЕХАНИКЕ ВДОЛЬБЕРЕГОВОГО ПЕРЕНОСА НАНОСОВ НА МОРСКИХ ПОБЕРЕЖЬЯХ

А.Е. Щодро<sup>1</sup>, Д.А. Антоненков<sup>2</sup>, А.Н. Сорокин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28  
*E-mail: ashodro@ya.ru*

<sup>2</sup>ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН»  
РФ, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
*E-mail: dmitry\_science@mail.ru*

<sup>3</sup>ИП «Сорокин А.Н.», РФ, г. Севастополь.

В работе рассмотрены некоторые вопросы формирования вдольберегового переноса наносов, имеющие принципиальное отношение к замыву пространства между поперечными берегозащитными сооружениями, оценке эффективности продольных волногасящих и берегозащитных сооружений, способствующих накоплению наносов и сохранению пляжей. Описана модель энергетического спектра волн для шторма заданной обеспеченности, позволяющая выполнять количественный анализ наносов, переносимых вдольбереговым течением на отдельных участках берега моря. Описана модель движения частиц наносов при обрушении крупной волны в пределах прибрежной зоны, взмучивания массы частиц и дальнейшего их движения. Анализируется взмучивающее действие потока на отдельных участках побережья.

**Ключевые слова:** перенос наносов, берегозащитные сооружения, течение, проектирование, моделирование, формирование пляжей.

Поступила в редакцию: 24.10.2023. После доработки: 16.11.2023.

**Введение.** Задача формирования морского дна вблизи берега, при работе поперечных или продольных волногасящих и берегозащитных сооружений очень важна. Сохранение и восстановление пляжных территорий также представляется весьма актуальным вопросом. Основные переформирования прибрежных и пляжных территорий связаны, как известно, со штормовой активностью моря. Рассуждения, приводимые в настоящей статье, связаны со средней штормовой активностью, то есть с наиболее мощными штормами, которые бывают в среднем ежегодно.

Как отмечалось в работе [1], баланс наносов на каком-либо конкретном участке побережья зависит от поступления наносов и их ухода во вдоль береговом направлении, а также в поперечном к нему направлении, перпендикулярно к урезу воды. Количественная оценка этих компонентов изучалась подробно И. О. Леонтьевым. В настоящей работе нас будет интересовать местный баланс и соотношение количества взмучиваемых

наносов, поднимаемых водной средой от поверхности дна и переходящих во взвешенное состояние, и проходящих транзитом над рассматриваемой точкой дна. Именно это соотношение и определяет нарастание или убывание отметки его поверхности.

Проводя аналогию прибрежных явлений и русловых процессов в речных потоках, заметим, что взаимодействие водного потока и деформируемого русла является главным элементом описания русловых процессов в целом, суть которых состоит в образовании русла, крупных береговых форм, его вертикальных и горизонтальных смещениях, изменении его формы и размеров, а также и в локальном смысле, – например, формировании пляжной отмели в какой-либо зоне побережья, образования донных гряд, перекатов, излучин, и т.п. Саморегулирующийся процесс динамического взаимодействия водного потока с руслом выражается в постоянном обмене потока и русла наносами, и осуществляется за

счет их непрерывного оседания и взвешивания.

Проблемы взвешивания и переноса наносов рассматриваются обычно в нескольких аспектах [1–5], а именно:

1. Взвешивание частиц, то есть проблема их отрыва от дна, или потеря устойчивости массы поверхностного грунта; сюда относится также вопрос о природе начального импульса, который придается оторвавшимся частицам.

2. Движение отдельных частиц в потоке с учетом действующих на них сил.

3. Движение дисперсоида, условной сплошной среды – смеси воды и наносов в целом.

4. Движение составляющих дисперсоида (жидкой и твердой фаз) раздельно.

5. Движение твердой составляющей дисперсоида вблизи дна на основе балансовых соотношений с учетом конвекции твердых частиц и их массового смыва как диффузионного процесса.

6. Массовый смыв грунта в результате действия касательных напряжений на дне с учетом баланса других силовых факторов.

**Цель настоящей работы** создание идеологической базы для проведения балансовых расчётов по наносам и определение вертикальных координат поверхности грунта при прохождении шторма на основе уравнения баланса наносов, а также для проведения прогноза переформирований дна на рассматриваемых участках в многолетнем аспекте.

**Материалы и методы.** *Модель энергетического спектра волн для шторма заданной обеспеченности.* Рассматривается среднемаксимальный шторм, то есть шторм наибольшей силы, встречающийся по многолетним данным в среднем один раз в год. Устанавливается спектральный состав энергии (или высот) волн для такого шторма. Для наиболее крупных волн – 3–5% обеспеченности из совокупности волн данного шторма, проводятся дальнейшие вычисления.



**Рис. 1.** Обрушение крупной штормовой волны; видны следы крупной массы, ушедшей в нижние слои потока

**Fig. 1.** Collapse of a large storm wave; traces of a large mass that has gone into the lower layers of the stream are visible

*Модель движения частиц наносов при обрушении крупной волны в пределах прибрежной зоны.* После взмучивания массы частиц крупной волной (рис. 1) и начала их движения со вдольбереговым потоком формируется структура квазиравномерного потока, возмущаемого более мелкими волнами, но обеспечивающего прохождение песчаных частиц на

значительные расстояния с их отложением за волногасящим сооружением. Подобная модель, позволяющая определить расход наносов, описана в работе [1].

Обратимся к дальнейшим расчётам по определению вертикальных координат пляжной отмели в районе проектируемого сооружения.

Рассматривая два разных подхода к изучению взаимодействия потока с размываемым руслом, отметим, что соответственно пп. 1, 2, 4 введения, – это начало движения отдельных частиц, и такая схема применима к разнородным грунтам, содержащим достаточно крупные фракции; и второе направление, – оно соответствует пунктам 3, 5, 6 введения. Это поведение частиц наносов, как

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon \frac{\partial c}{\partial z} \right) - w_0 s, \quad (1)$$

где  $u, v, w$  – компоненты скорости;  $s$  – мутность потока;  $\varepsilon$  – коэффициент диффузии;  $w_0$  – гидравлическая крупность частиц (скорость их оседания в спокойной воде).

В работах [7–9] (математические модели размыва несвязного грунта) проведено моделирование заиления и конвективно-диффузионного переноса донных частиц мелкого грунта ( $w_0/U_0 < 3,5 \dots 4,0$ ). Для анализа перехода в поток и транспортировки таких относительно мелких частиц грунта рассмотрено динамическое равновесие поверхностного слоя грунта, в котором и вода, и грунтовые частицы движутся. Сначала было проанализировано поведение самого грунта при скоростях потока над ним, близких к критическим. Показано, что для размеров частиц менее 1 мм однородного грунта следует учитывать закономерности проникновения давления в грунт, а для частиц с  $d > 5$  мм следует учитывать и фазу задержки процесса изменения давления в грунте. То есть непрерывный характер проникновения давления, и связанных с ними малых движений частиц грунта, свидетельствует в этом случае о целесообразности рассмотрения процесса подъема частиц как непрерывного перехода от неподвижного грунта основания к водогрунтовой смеси, которая движется с потоком и обменивается с дном молями массы за счет их диффузии. Показано также, что существует прямая однозначная связь осредненных касательных напряжений на поверхности и вероятности потери устойчивости частиц мелкого грунта.

бы отвечающих условиям их существования в некотором континууме.

Соответственно второй схеме с учетом однородного и мелкозернистого состава большинства пляжей, уравнения переноса скалярной субстанции выглядит следующим образом [5–7] с учетом соответствующих начальных и граничных условий

Отрыв и транспортировка относительно мелких частиц исследовались с помощью системы конвективно-диффузионных уравнений. При этом рассматривался процесс конвективной диффузии донных частиц грунта в результате воздействия на них турбулентного водного потока, скорость которого

$\vec{V}(u(x, y), v(x, y))$  в области  $G = \{(x, y): -\infty < x < +\infty, 0 < y < l(x, t)\}$ , ограниченной условно горизонтальной линией  $y = 0$  (поверхностью жидкости) и переменной во времени границей  $L (y = l(x, t))$  – линией раздела придонной жидкости и твердой фазы. В случае преобладания его конвективной составляющей над диффузным. Отрыв, перемещения и оседания частиц под воздействием водного потока в такой модели будем рассматривать как диффузию с некоторым фиктивным «коэффициентом диффузии». Вследствие массопереноса донных частиц через линию  $L$  (поверхность дна), ее очертание со временем меняется. Процесс деформации русла, таким образом, может быть описан такой модельной задачей

$$\varepsilon \frac{\partial}{\partial y} \left( D(x, y) \frac{\partial c}{\partial y} \right) - u(x, y) \frac{\partial c}{\partial x} - v(x, y) \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial c}{\partial t}, \quad (2)$$

$$c(x, y, 0) = \bar{c}(x, y), \quad \left. \frac{\partial c}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad (3)$$

$$c|_{y=l(x,t)} = c,$$

где  $c(x, y, t)$  – концентрация наносов (диффундирующих частиц) в точке  $(x, y)$  в момент времени  $t$ ;  $\varepsilon D(x, y)$  – фиктивный «коэффициент диффузии», который свя-

зан с интенсивностью проникновения частиц грунта в жидкость;  $\varepsilon$  – малый параметр;  $l(x, t)$  – неизвестная функция, характеризующая положение поверхности дна в данный момент времени,  $l(x, t) > 0$ . Для определения значений фиктивного коэффициента диффузии  $D$  предлагается соотношение [7–9]

$$D = \chi \lambda^{\mu V + \beta \frac{\partial V}{\partial p}}, \quad (4)$$

где  $\chi, \lambda, \mu, \beta$  – некоторые числа.

Решение задачи (2), (3) производится путем дискретизации времени  $t$  со столь малым шагом  $\Delta t$ , чтобы на каждом из промежутков  $[t_k, t_{k+1}]$  можно было бы пренебречь изменением границы  $L$ , считая ее при  $t_k < t < t_{k+1}$  фиксированной –  $L = L_k = \{(x, y): y = l(x, t_k)\}$ . Далее специальным образом строим новое положение кривой  $L = L_k + I$ , которую следует принимать за приближение границы области для следующего этапа времени. На следующих стадиях размыва вместо переменных  $x$  и  $y$  вводятся переменные  $s$  и  $r$ , таким образом, что расчетная область деформируется по вертикали. Учитывается также кривизна дна в условии баланса твердого материала у дна. Подбор параметров  $\chi, \lambda, \mu, \beta$  в формуле (4) для практических расчетов осуществляется путем сравнения результатов численных экспериментов при различных значениях этих параметров с данными натурных исследований, причем принимаются во внимание не только глубина размыва, но и его форма.

На основании этого нами получены формула для нахождения значений коэффициента  $\chi$  [9]

$$\chi = 0,05 R^{3,4} d^{-0,13} e^{1,1 u_{\infty}}$$

и определены следующие ориентировочные значения этих параметров:  $\lambda = 2$ ;  $\mu = 0,75$ ;  $\beta = 1,5$ .

Область изменения параметров в данной зависимости следующая:  $d$  –  $0,1 \dots 2$  мм,  $U_0$  –  $0,25 \dots 4$  м/с.

Взаимное влияние потока и его размываемого ложа характеризуется изменением геометрических очертаний его

границ и изменением кинематических условий, связанных как с изменением геометрии границ, так и с насыщением потока наносами. Турбулентный водный поток оказывает сложное по характеру воздействие на свое ложе. Размывающую способность потока можно оценивать двумя способами:

- по касательным напряжениям на дне и силе, передаваемой от потока на некоторый участок дна, безотносительно отдельных частиц, лежащих на дне,

- либо по силам, действующим на отдельные частицы и вызывающим их срыв. Соответственно существует два направления в оценке условий начала смыва грунта или какой-то характерной стадии в развитии процесса его вымыва.

Первое направление назовем *глобальным*, а второе – *локальным* подходом к оценке критических состояний, или интенсивности смыва грунтовых частиц. При этом глобальный подход может означать оценку размывающей способности на некоторой площади дна конечных размеров при осреднении всех параметров потока по этой площади, а также ее оценку в некоторой точке, где указываются локальные значения характеристик потока, но безотносительно тех конкретных частиц, которые здесь находятся. Осредненные касательные напряжения определяются на границе потока так же, как и в его толще, считаясь прямо пропорциональными градиентам осредненных скоростей. Пульсации же касательных напряжений зависят всецело от турбулентной структуры, то есть насыщенности потока вихрями, ориентации их осей в пространстве и параметров шероховатости. Таким образом, силовое воздействие потока на частицы грунта, слагающего ложе водотока, определяется тремя взаимосвязанными основными факторами – полем осредненных скоростей, состоянием придонной турбулентности и структурой зернистой поверхности дна.

Глобальный и локальный подходы в оценке размывающей способности потока дополняют друг друга и оба используются в настоящей работе. Глобальный

подход может быть применен при оценке количества смываемого относительно однородного и мелкого грунта при известной кинематике потока, причем, на основе кинематики предварительно вычисляются касательные донные напряжения. Должно быть известным также поле донных давлений.

Локальный подход необходим при расчетах в неоднородных и крупнозернистых грунтах. Между результатами расчетов на основе обоих подходов устанавливается соответствие.

Описывается вначале теоретическая концепция, устанавливающая связь между пульсацией донного давления и кинематическими характеристиками потока. При этом оказывается, что пульсации донного давления, проникающие в глубину грунтового массива, существенно взвешивают грунт, а мгновенные скорости поднимают и переносят частицы грунта. Поэтому существенной является связь между указанными характеристиками. Следует отметить, что именно кинематические характеристики потока, осредненные и пульсационные скорости, наиболее надежно фиксируемые в ходе эксперимента, и должны служить главным фактором в оценке размывающей способности потока.

Затем устанавливается связь пульсаций скорости с мгновенными касательными донными напряжениями, включающими их осредненные значения и пульсационные компоненты. Теоретические основы расчета массового смыва мелкого однородного грунта разрабатываются далее, на основе глобального подхода, как исходя из концепции проникновения пульсаций давления в грунт, так и оценки общей меры возмущенности турбулентного потока. Последнюю, как известно, можно оценивать, как по уровню пульсаций скоростей так по уровню пульсаций давления или касательных напряжений. Делается вывод о достаточности учета лишь разности амплитуд мгновенных давлений над размываемым верхним слоем грунта и под ним. Фазовое отставание пульсаций под частицами проявляется лишь в очень мелких грунтах, для которых характер-

ным является массовый смыв грунта с поверхности, омываемой потоком, и учитывается через эмпирические коэффициенты. Указанная поправка к разности амплитуд давлений для крупных частиц с учетом фазового отставания не превышает 0,015-0,017 максимального перепада давлений во внешней части потока, над дном.

На основе анализа связи пульсаций рассмотренных гидродинамических величин делается вывод о достаточности некоторой единой характеристики (далее – коэффициентом диффузии наносов, лежащих на дне). То есть здесь используется идея так называемой «*массообменно-диффузионной*» теории размыва, в соответствии с которой смыв наносов с поверхности ложа потока представляет собой диффузионный процесс переноса массы через некоторую границу, параллельную основному движению потока. К этой идее подводят именно результаты исследований проникновений пульсаций давления в грунт, взвешивающих его частицы, вибрации частиц на поверхности и в глубине грунта, пульсации касательных напряжений, приводящих к отрыву отдельных зерен, а также групп частиц.

Далее, уже, используется локальный подход к определению *вероятности отрыва от дна отдельных частиц* неоднородного грунта. При этом методом имитационного моделирования учитываются статистические характеристики пульсирующей придонной скорости, а также механический состав грунта.

В работах [7–9] разработана развиваемая ниже «*массообменно-диффузионная*» теория переформирования дна, которая используется для расчета деформаций дна в относительно мелких грунтах (при  $U_0/w > 3,5 \dots 4,0$ ) и требует для определения коэффициентов диффузии, учитывающих смыв частиц грунта со дна, расчетов по всем предыдущим моделям и, кроме того, данных экспериментов.

Исследование диффузионных процессов в пограничной области с переменной границей.

Будем рассматривать, отрыв от дна твердых частиц турбулентным потоком, их перенос и отложение на дно как конвективную диффузию. Интенсивность проникновения твердых частиц в поток определяется коэффициентом диффузии  $\varepsilon D(x, y, z, t)$ , отличающимся от аналогичного коэффициента для жидких частиц.

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \varepsilon D(x, y, z, t) \frac{\partial c}{\partial z} \right) - u(x, y, z, t) \frac{\partial c}{\partial x} - v(x, y, z, t) \frac{\partial c}{\partial y} - (w(x, y, z, t) + w_0) \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial c}{\partial t}, \quad (5)$$

$$c(x, y, z, 0) = \bar{c}(x, y, z), \quad \left. \frac{\partial c}{\partial y} \right|_{y=\pm \frac{B}{2}} = 0, \quad \left. \frac{\partial c}{\partial z} \right|_{z=0} = 0, \quad c|_{z=l(x, y, t)} = c_*, \quad (6)$$

где  $c(x, y, z, t)$  – концентрация твердых частиц в точке  $(x, y, z)$  в момент времени  $t$ ;  $u(x, y, z, t)$ ,  $v(x, y, z, t)$ ,  $w(x, y, z, t)$  – компоненты скорости потока;  $w_0$  – гидравлическая крупность твердых частиц;  $B$  – ширина потока;  $l(x, y, t)$  – неизвестная функция, которая характеризует положение поверхности дна в данный момент времени,  $l(x, y, t) > 0$ ;  $\varepsilon$  – малый параметр. С целью упрощения исходных уравнений задачи пренебрегаем относительно малым диффузионным переносом в направлениях осей  $OX$  и  $OY$ .

Произведем условное «выпрямление» в плоскость поверхности, образованной плавной линией тока [7–9], проведенной в плане на схеме движения потока, и вертикальными образующими (вертикалями глубин). обозначив продольную координату через  $s$ , будем решать для этой плоскости задачу о размыве дна и о переносе частиц, продуктов размыва в системе уравнений (2–6).

$$\left( \varepsilon D(x, y, z, t_k) \frac{\partial c_k}{\partial n} - (V_n(x, y, z, t_k) + w_{0n}) \cdot c_k \right) \Big|_{z=l(x, y, t_k)} = c_* \frac{dl(x, y, t_k)}{dt}, \quad (7)$$

где  $n$  – единичный вектор нормали к границе области, ориентированный в ее середину,  $c_*$  – заданная концентрация частиц на дне.

В случае небольших изменений положения поверхности дна для учета их влияния на распределение скоростей предлагаем использовать множитель

Поверхность раздела жидкости и дна рассматривается здесь как переменная во времени граница  $L(z=l(x, y, t))$  расчетной области. В случае преобладания конвективной составляющей над диффузионной такой процесс будем описывать следующей системой

Решение задачи (2–6) находим приближенно, путем решения систем соответствующих конечно-разностных аналогов этих уравнений, проведя дискретизацию времени  $t$  с настолько малым шагом  $\Delta t$ , чтобы на любом из промежутков  $[t_k, t_{k+1}]$  можно было пренебречь изменением границы  $L$  и считать ее фиксированной –  $L=L_k=\{(x, y, z): z=l(x, y, t_k)\}$ . Найдя решение поставленной задачи в области с уже неизменным во времени участком границы  $L_k$ , специальным способом строим новое положение кривой  $L=L_{k+1}$ , которое будем принимать за приближение границы области для следующего этапа времени, и т.д.

Для корректирования кривой  $L$  (свободного участка границы исходной области) после каждого временного этапа используется дополнительное условие, которое связывает поток твердых частиц грунта через свободный участок границы и скорость изменения положения поверхности дна. Такое условие имеет вид

$l_0/l(x, y, t_k)$  для плановых компонент скорости, а вертикальную – находить с учетом уравнения неразрывности. Здесь  $l_0$  – осредненное (первоначальное) значение глубины потока.

Коэффициент диффузии  $\varepsilon D$  нами принимался, в соответствии с гипотезой

Маккавеева о коэффициенте турбулентного обмена, пропорциональным осредненной скорости потока

$$\varepsilon D = k V_n, \quad (8)$$

а концентрация наносов в начальный момент времени – соответственно диффузной теории взвешивания мелких частиц, в виде [6]

$$\bar{c}(x, z) = c_* e^{-\gamma(\bar{v}(x) - z)}. \quad (9)$$

Заметим, что решение исходных модельных задач, которые описывают процесс конвективной диффузии в областях со свободным участком границы при условии преобладания его конвективной составляющей над диффузионной, может быть найдено также и численно-асимптотическим методом. Ниже покажем на примере расчета формирования песчаных гряд технику применения конечно-разностного метода (рис. 2, 3).

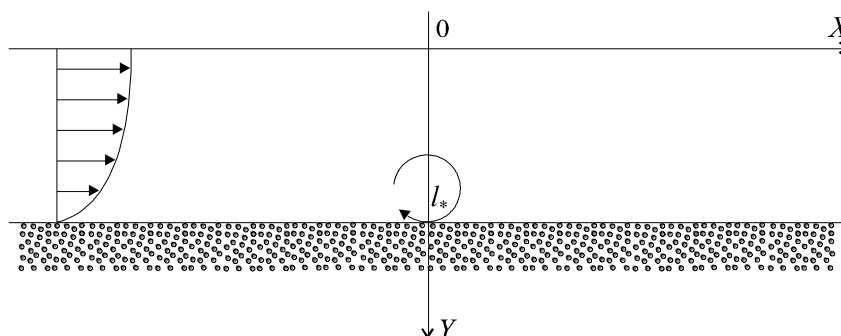


Рис. 2. Схема возмущения движения водного потока в момент начала образования песчаной волны, возбуждаемой локальным вихрем

Fig. 2. Diagram of the perturbed movement of the water flow at the moment of the beginning of the formation of a sand wave excited by a local vortex

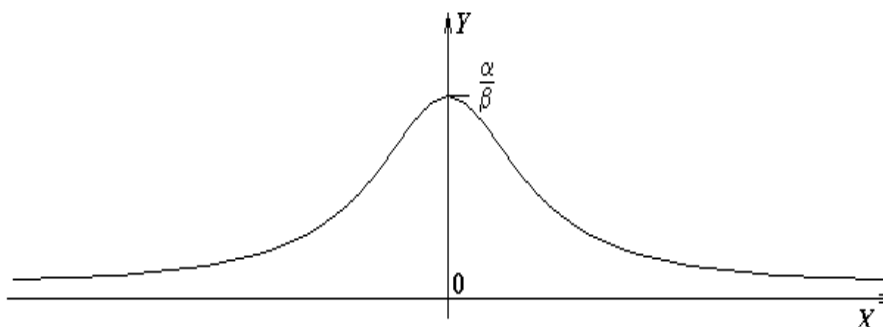


Рис. 3. График изменения коэффициента диффузии  $D(x)$  по длине потока при исследовании влияния одиночного вихревого образования на процесс возникновения песчаных волн

Fig. 3. A graph of the change in the diffusion coefficient  $D(x)$  along the length of the flow in the study of the effect of a single vortex formation on the process of the occurrence of sand waves

Образование грядовой формы русла связано с влиянием на поверхность песчаного дна присущих турбулентному режиму движения жидкости крупномасштабных пульсаций, вызванных локально расположенными вихревыми образо-

ваниями. Наличие такого рода образований приводит к увеличению интенсивности вымыва грунта на одном из участков русла. Вымытые на этом участке частицы, переносимые потоком, оседают на поверхность дна на некотором рас-

стоянии от места их отрыва, образуя при этом гряду с поперечным вальцем за ней.

Рассмотрим процесс образования такой песчаной волны в начальный момент времени на небольшом участке русла под влиянием одиночного вихревого образования. Для моделирования этого процесса воспользуемся диффузионной теорией, в которой смыв частиц грунта под влиянием водного потока будем рассматривать как их диффузию с некоторым «фиктивным» коэффициентом  $D'$ . Влияние крупномасштабных пульсаций на поверхность дна будем учитывать переменным по длине потока коэффициентом диффузии. Пренебрегая пространственными эффектами, будем рассмат-

ривать процесс взвешивания наносов в области  $G=\{(x,y): -\infty < x < +\infty, 0 < y < l(x,t)\}$  (рис. 3 – 4), ограниченной горизонтальной линией  $y=0$  (поверхностью жидкости) и переменной в времени границей  $L$  ( $y=l(x,t)$ ) – дном. Будем считать также, что перенос наносов в потоке, скорость которого равна  $V$  осуществляется преимущественно за счет конвекции. Вследствие массопереноса донных частиц через линию  $L$  (поверхность дна), ее вид с течением времени изменится. Характер этого изменения будет определен ниже.

Учитывая вышесказанное и пренебрегая гидравлической крупностью частиц грунта, будем описывать данный процесс следующей модельной задачей (10–11)

$$\varepsilon \frac{\partial}{\partial y} \left( D(x,y) \frac{\partial c}{\partial y} \right) - u(x,y) \frac{\partial c}{\partial x} - v(x,y) \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial c}{\partial t} \quad , \quad (10)$$

$$c(x,y,0) = \bar{c}(x,y), \quad \left. \frac{\partial c}{\partial y} \right|_{y=0} = 0, \quad c|_{y=l(x,t)} = c_* \quad ,$$

где  $c(x,y,t)$  – концентрация наносов (диффундирующих частиц) в точке  $(x,y)$  в момент времени  $t$ ;  $D' = \varepsilon D(x,y)$  – фиктивный «коэффициент» диффузии, который связан с интенсивностью проникновения частиц грунта в жидкость;  $\varepsilon$  – малый параметр, характеризующий долю диффузионного переноса;  $l(x,t)$  – неизвестная функция, характеризующая положение поверхности дна в данный момент времени,  $l(y,t) > 0$ .

Заметим, что в (10) отсутствует член  $\varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left( D(x,y) \frac{\partial c}{\partial x} \right)$ , которым пренебрежем в сравнении с членом  $\varepsilon \frac{\partial}{\partial y} \left( D(x,y) \frac{\partial c}{\partial y} \right)$ . Вид функции  $D(x,y)$  для такого случая будет подобран ниже.

Решение задачи (10) ищем приближенно. Для этого проведем дискретизацию времени  $t$  с настолько маленьким

шагом  $\Delta t$ , чтобы на любом из промежутков  $[t_k, t_{k+1}]$  можно было бы пренебречь изменением границы  $L$  и будем считать ее при  $t_k < t < t_{k+1}$  фиксированной –  $L=L_k = \{(x,y): y=l(x,t_k)\}$ . Найдя решение поставленной задачи в области с неизменным во времени участком границы  $L_k$ , специальным образом строим (как возмущение  $L_k$ ) новое положение кривой  $L=L_{k+1}$ , которое будем принимать за приближение границы области для следующего этапа времени.

Для корректировки границы  $L$  (свободного участка границы исходной области) после каждого временного этапа введем дополнительное условие баланса массы наносов, которое связывает поток донных частиц грунта через свободный участок границы и скорость изменения положения поверхности дна. Такое условие имеет вид

$$\left[ \varepsilon D(x,y) \frac{\partial c_k(x,y)}{\partial y} - v(x,y) \cdot c_k(x,y) \right]_{y=l(x,t_k)} = c_* \frac{\Delta l(x,t_k)}{\Delta t} \quad , \quad (11)$$



где  $\Delta l(x, t_k)$  – изменение положения границы  $L$  после  $k$ -го временного этапа за промежуток времени  $\Delta t$ .

Используя конечно-разностный или асимптотический метод [6–8], находим уравнения кривой, которая будет играть роль фиксированной границы раздела жидкой и твердой фаз на временном промежутке  $[t_{k+1}, t_{k+2}]$

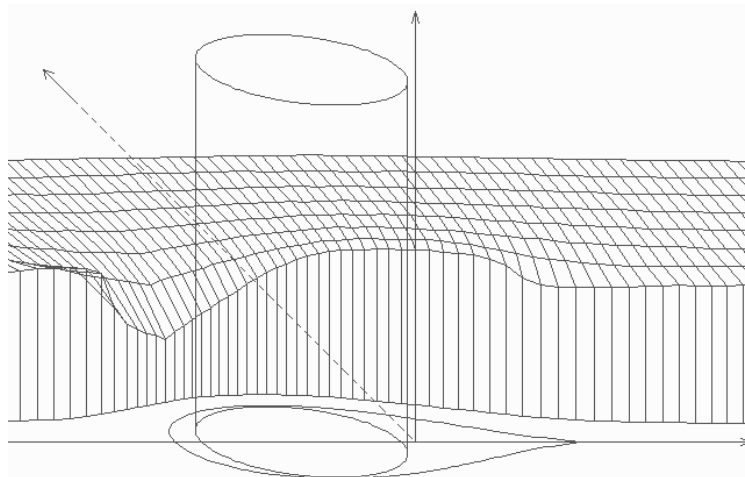
$$l(x, t_{k+1}) = l(x, t_k) + \Delta l(x, t_k).$$

Для последующих временных отрезков также ищем решение выше представленной задачи с новой криволинейной границей  $L_{k+1}$ .

Заметим, что, поскольку причиной появления на дне потока песчаных волн являются крупномасштабные пульсации, выбор функции  $D(x, y)$  должен быть согласован с характером изменения такого

рода пульсаций. Влияние крупномасштабной турбулентности на процесс образования песчаных волн детально исследовался Михайловой Н.А. [6]. Результаты расчетов показаны на рис. 4.

Для получения натуральных данных о параметрах движения наносов, а именно размерного состава и скорости перемещения частиц необходимых для верификации наших моделей возможно применять методы, основанные на обработке фото и видеоизображений среды [10]. В частности, опытный образец прибора «Визуализатор потока» [11] позволяет получать данные о скорости движения частиц в придонном слое. Разработанная экспериментальная установка [12] позволяет определять размерный состав донных наносов путем анализа фотоизображений отобранных проб.



**Рис. 4.** Расчетная конфигурация поверхности дна вблизи цилиндрического препятствия (мостовой опоры):  $u_\infty=1,5\text{м/с}$ ,  $R=1\text{м}$ ,  $H=1\text{м}$ ; грунт – однородный, с диаметром частиц 1мм

**Fig. 4.** Calculated configuration of the bottom surface near a cylindrical obstacle (bridge support):  $u_\infty=1.5\text{m/s}$ ,  $R=1\text{m}$ ,  $H=1\text{m}$ ; the soil is homogeneous, with a particle diameter of 1mm

**Выводы.** В механике вдольберегового переноса наносов на морских побережьях и на водохранилищах требуется рассматривать движение некоторого квазиравномерного потока, возмущаемого прибрежным волнением и переносящего

основную массу наносов, переведенных во взвешенное состояние при обрушении наиболее крупных волн. Проводя рассуждения относительно среднемаксимальных штормов, необходимо рассматривать спектр волновых энергий данного

шторма, и, выделяя наиболее энергичные волны, приходящуюся на одну, самую крупную из 20 – 50 регулярных волн, определять количество взвешиваемого материала, исходя из энергии обрушения этой волны. Для верификации разработанных моделей возможно использование методов, основанных на обработке фото и видеоизображений, позволяющих оперативно получать требуемые данные.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИПТС по теме «Фундаментальные и прикладные исследования закономерностей и механизмов формирования региональных изменений природной среды и климата под влиянием глобальных процессов в системе океан-атмосфера и антропогенного воздействия» (№ госрегистрации 121122300072-3) и ФИЦ МГИ РАН № FNNN-2021-0005 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»).*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щодро А.Е., Сорокин А.Н. Контроль баланса наносов на участке морского побережья и анализ работы сквозных берегозащитных сооружений вблизи города Калининграда // Система контроля окружающей среды. ИПТС. Севастополь. 2022 г. №3 (49). С. 69–78.
2. Савенко В.Я., Щодро О.Є., Словінська О.С. Дослідження місцевих розмивів біля мостових опор // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. К.: НТУ. 2003. Вип. 66. С. 188–198.
3. Алибеков А.К. Оценка размыва у свайных опор сооружений, пересекающих водотоки, с учетом показателей надежности и неоднородности грунтов основания. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018. 45 (1). С. 181–192.
4. Komarova N.L., Hulscher Suzanne J.M.H. Linear instability mechanisms for sand wave formation // Journal of Fluid Mechanics. 2000. V. 413. P. 219–246.
5. Coleman S.E., Fedele J.J., Garcia M. H. Closed-conduit bed-form initiation and development // Journal of Hydraulic Engineering. 2003. V. 129. No. 12. P. 956–965.
6. Михайлова Н.А. Перенос твердых частиц турбулентными потоками воды / Л.: Гидрометеиздат. 1966. 234 с.
7. Бомба А.Я., Барановський С.В., Щодро О.Є. Розрахунок пульсацій тиску в ґрунтовому середовищі: матеріали науко-техн. конфер. УДАВГ /Рівне: Вид-во УДАВГ. 1995. Част. 1. 64 с.
8. Бомба А.Я., Барановський С.В., Щодро О.Є. Про моделювання і дослідження сингулярно-збурених дифузійних процесів у контрастних середовищах // Волинський математичний вісник. 1996. Вип. 2. С. 22–27.
9. Барановський С.В. Математичне моделювання процесу деформації нез'язного піщаного русла турбулентним водним потоком // Тернопіль. 2000. 20 с.
10. Antonenkov D.A. Method of the Aquatic Environment Image Processing for Determining the Mineral Suspension Parameters // Physical Oceanography. 2016. № 5. P. 36–44.
11. Антоненков Д.А. Измерительный комплекс для исследования динамических характеристик и структуры течения водного потока в прибрежной морской зоне // Известия вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 12. С. 1112–1118.
12. Антоненков Д.А. Метод контроля размерного состава частиц минеральной взвеси с помощью программной обработки фотоизображений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. Севастополь. Вып. 2. 2018. С. 47–52.

ON THE MECHANICS OF LONG-SHORE SEDIMENT TRANSFER ON THE SEA COASTS

A.E. Shchodro<sup>1</sup>, D.A. Antonenkov<sup>2</sup>, A.N. Sorokin<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Institute of natural and technical systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

<sup>2</sup>Marine Hydrophysical Institute of RAS, RF, Sevastopol, Kapitanskaya St., 2

<sup>3</sup>PE «Sorokin A.N.», RF, Sevastopol

The paper considers some issues of formation of long-shore sediment transfer, which are fundamentally related to the washing of the space between transverse coastal protection structures, evaluating the effectiveness of longitudinal wave-extinguishing and coastal protection structures that contribute to the accumulation of sediment and the preservation of beaches. A model of the wave energy spectrum for a storm of a given security is described. The model makes it possible to perform a quantitative analysis of sediments transferred by the long-shore current in certain areas of the seashore. A model of the movement of sediment particles during the collapse of a large wave within the coastal zone, the re-suspension of the particle mass and the beginning of their movement is described. The re-suspension effect of the flow in certain areas of the seashore is analyzed.

**Keywords:** sediment transfer, coastal protection structures, current, design, modeling, formation of beaches.

REFERENCES

1. Shchodro A.E. and Sorokin A.N. Kontrol` balansa nanosov na uchastke morskogo poberezh`ya i analiz raboty skvoznyh beregozashhitnyh sooruzhenij vblizi goroda Kaliningrada (Monitoring the sediment balance on a section of the sea coast and analyzing the operation of end-to-end coastal protection structures near the city of Kaliningrad). *Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy*, IPTS, Sevastopol`, 2022, No. 3(49), pp. 69–78.
2. Savenko V.Ya, Shchodro O.C., and Slovins`ka O.S. Doslidzhennya misceviv rozmyviv bilya mostovix opor (Study of local erosion near bridge piers). *Avtomobil`ni dorogi i dorozhne budivnicтво*, Kyiv: NTU, 2003, Vol. 66, pp. 188–198.
3. Alibekov A.K. Ocenka razmyva u svajnyh opor sooruzhenij, presekayushchih vodotoki, s uchetom pokazatelej nadezhnosti i neodnorodnosti gruntov osnovaniya (Assessment of erosion at pile supports of structures that cross watercourses, taking into account indicators of reliability and heterogeneity of foundation soils). *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2018, Vol. 45 (1), pp. 181–192.
4. Komarova N.L. and Hulscher Suzanne J.M.H. Linear instability mechanisms for sand wave formation *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, Vol. 413, pp. 219–246.
5. Coleman S.E., Fedele J.J., and Garcia M. H. Closed-conduit bed-form initiation and development. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, Vol. 129, No. 12, pp. 956–965.
6. Mihajlova N.A. Perenos tverdyh chasticz turbulentny`mi potokami vody (Transport of solid particles by turbulent water flows). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1966, 234 p.
7. Bomba A.Ya., Baranovs`kij S.V., and Shchodro O.C. Rozraxunok pul`saczij tisku v gruntovomu seredovishhi (Calculation of pressure pulsations in the soil environment). Proc. scientific and technical Conference, UDAVG Rivne: Izd-vo UDAVG, 1995, Part 1, 64 p.
8. Bomba A.Ya., Baranovs`kij S.V., and Shchodro O.C. Pro modelyuvannya i doslidzhennya singularno-zburenix difuzijnix procesiv u kontrastnix seredovishhax (On modeling and research of singularly perturbed diffusion processes in contrasting media). *Volins`kij matematichnij visnik*, 1996, Vol. 2, pp. 22–27.
9. Baranovs`kij S.V. Matematichne modelyuvannya procesu deformacziï nezv`yaznogo pishhanogo rusla turbulentnim vodnim potokom (Mathematical modeling of the process of deformation of a loose sand bed by a turbulent water flow). Ternopil`, 2000, 20 p.
10. Antonenkov D.A. Method of the Aquatic Environment Image Processing for Determining the Mineral Suspension Parameters. *Physical Oceanography*, 2016, No. 5, pp. 36–44.
11. Antonenkov D.A. Izmeritel`nyj kompleks dlya issledovaniya dinamicheskix harakteristik i struktury techeniya vodnogo potoka v pribrezhnoj morskoy zone (Measuring complex for studying the dynamic characteristics and structure of water flow in the coastal sea zone). *Izvestiya vuzov. Priboro-stroenie*, 2020, Vol. 63, No. 12, pp. 1112–1118.
12. Antonenkov D.A. Metod kontrolya razmernogo sostava chastic mineral'noj vzvesi s pomoshch'yu programmnoj obrabotki foto-izobrazhenij (Method for monitoring the size composition of particles of mineral suspension using software processing of photo images). *Ecological safety of the coastal and shelf zones of the sea*, Sevastopol, 2018, Vol. 2, pp. 47–52.