

УДК 551.46 (075.8)

М.П.Лобачев¹, А.В.Пустошный¹, К.Е.Сазонов¹, И.А.Чичерин¹

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУИ ОТ ВИНТА С ГРУНТОМ

Рассматривается задача эрозии грунта струей гребного винта судна. Численное моделирование вязкого течения осуществляется на основе решения уравнений Рейнольдса, замкнутых $k - \epsilon$ моделью турбулентности. Влияние работы винта моделируется дополнительными источниками членами в уравнениях Рейнольдса. Зоны возможной эрозии определяются путем сравнения рассчитанных касательных напряжений на грунте с предельными касательными напряжениями, при которых начинается эрозия. Рассматривался ряд задач, возникающих при работе судов на мелководье. С использованием численного метода были определены размеры и конфигурация зон возможной эрозии грунта, а также условия (глубина, нагрузка гребного винта и т.п.), при которых отсутствует эрозия.

В последние годы после довольно длительного периода застоя стал наблюдаться рост объемов перевозок морским и речным транспортом. Важной особенностью этого роста является ориентация на увеличение объема перевозок сырой нефти, добытой на шельфе окраинных и внутренних морей. При разработке ряда месторождений нефти на шельфе приходится сталкиваться с проблемой эксплуатации нефтеналивного флота в условиях мелководья. Характерные глубины, как у буровых, так и у загрузочных терминалов в Арктике составляют 16 - 20 м. На севере Каспия глубины могут достигать нескольких метров. В этих условиях зазор между корпусом судна (танкера, судна-снабженца, буксира и т.д.) и дном акватории может быть весьма малым. Нижний предел зазора при этом зависит от сезонных условий безопасной эксплуатации, которая в летний период определяется наличием волнения, а зимой – ледяным покровом. Минимальный зазор при наличии волнения в среднем составляет 4,5 - 5 м, при отсутствии волнения может уменьшаться до 2 м. При таких малых зазорах возможно воздействие струи от винта на грунт с силой, приводящей к размыву грунта. Подобное наиболее вероятно при швартовке судна к буровой платформе или терминалу на шельфе, где глубина мала, а сам процесс загрузки судна длителен, либо при прохождении судном мелководных акваторий или каналов. Размыв грунта и его последующий перенос может представлять опасность как с точки зрения обеспечения безопасности эксплуатации флота, так и с экологической точки зрения. По мнению академика Г.Г.Матишова воздействие проходящих мелководье судов относится к числу факторов, которые могут оказывать влияние на донные биоценозы [1]. Прогнозирование подобных ситуаций, когда возможен размыв грунта, и определение режимов работы движителя, при которых размыв не происходит, представляется весьма важным с точки зрения безопасности мореплавания, устойчивости инженерных сооружений на грунте и экологии.

Условия задачи и метод ее решения. При рассмотрении транспортных операций на мелководном шельфе можно выделить ряд ситуаций, когда вероятность сильного размыва грунта резко повышается. Во-первых, при выполнении загрузочных операций у буровой или у терминала. В этом случае судно, пришвартованное к буровой носом, удерживается в заданном положении постоянной работой гребного винта на задний ход. Струя от винта первоначально распространяется в зазоре между грунтом и днищем судна. Затем она вы-

¹ ЦНИИ им.акад.А.Н.Крылова (Санкт-Петербург)
© М.П.Лобачев, А.В.Пустошный, К.Е.Сазонов, И.А.Чичерин, 2008

ходит из-под корпуса и ударяется в буровую. Так как процесс загрузки судна весьма длительный, то размыв грунта, как за счет прямой струи, так и за счет отраженной, может оказаться значительным. Размытый грунт может при этом откладываться достаточно неравномерно, создавая локальные повышения уровня дна. Уменьшение глубины при этом может достигать опасных для движения судов величин.

Удар струи от винта в буровую может быть прямым, если судно стоит перпендикулярно к буровой, или же косым, когда судно подходит под углом. В работе рассмотрен наиболее типичный случай фронтального подхода судна к буровой.

Вторым наиболее вероятным случаем сильного размыва грунта может быть движение на мелководье в ледовых условиях или при выполнении буксирных операций. В случае движения на мелководье задним ходом струя от винта при любой нагрузке распространяется в зазоре между корпусом и грунтом, что приводит к усилению ее воздействия на грунт, по сравнению со случаем движения вперед. При движении вперед опасная ситуация может возникнуть при большой нагрузке на винт. В обоих вариантах направления движения судна уменьшение скорости судна приводит к увеличению времени взаимодействия струи с локальным участком грунта, а значит и к увеличению глубины размыва. В случае, если перенос грунта осуществляется не по курсу движения судна, а далее мы покажем, что такие ситуации возможны, то также становится возможным значительное изменение рельефа дна.

Определение параметров течения при взаимодействии струи от винта и дна методами физического моделирования во многих случаях затруднено, так как моделирование приходится выполнять с нарушением критериев подобия [2]. В частности, в эксперименте по ряду причин необходимо использовать грунт с размерами частиц, соответствующих натурному грунту. Соответственно режим работы гребного винта следует выбрать таким, чтобы обеспечить условия размыва, а это не соответствует геометрическому масштабу модели. Надежные методики пересчета с модельных условий на натурные для таких задач пока не разработаны. В связи с этим актуальным оказывается разработка расчетных методов, позволяющих определять параметры взаимодействия струи от винта и грунта при любой геометрии окружающего пространства. Решение численными методами полной задачи, связанной с моделированием эрозии и переноса грунта, по ряду причин затруднено. Тем не менее решение упрощенной задачи – определение зон эрозии, без непосредственного моделирования самой эрозии, позволяет получить ценную информацию. Эти результаты могут использоваться для пересчета данных модельного эксперимента на натурные условия, а также при оценке влияния размыва на устойчивость инженерного сооружения на грунте и при решении экологических задач.

В данной работе моделирование условий размыва грунта выполнено применительно к одному объекту - танкеру дедвейтом 60 тыс. т, как представляющему в настоящее время наибольший интерес. Основные характеристики танкера приведены в таблице. Все рекомендации, приведенные в работе, относятся к этому же объекту. Однако форма представления результатов позволяет использовать их гораздо шире. Приведенные ниже систематические расчеты выполнялись при вариации наиболее значимых параметров задачи: упора гребного винта (скорость в струе винта) и отношения величины зазора к диаметру гребного винта, что позволяет использовать их для практических оценок.

Величины опасных касательных напряжений взяты из работы [3]. При $\tau_1 \leq \tau \leq \tau_2$ будет происходить частичный размыв грунта, более крупные фракции останутся неразмытыми. Величины τ_1 и τ_2 приняты как характерные в приведенном анализе.

Основные характеристики танкера и грунта

Характеристика	Величина
Дедвейт танкера, т	60000
Длина танкера, м	208
Осадка танкера, м	14
Диаметр гребного винта, м	6
Частота вращения движителя, об/с	77.4
Скорость движения танкера, м/с	2.57
Грунт	Несвязанный песок
Размер частиц грунта, мм	0.05 – 0.4
Величина касательных напряжений τ_1 , при которых начинается эрозия грунта, Па	1.16
Величина касательных напряжений τ_2 , при которых все частицы размером до 0.4 мм вымываются из грунта, Па	3.95

При швартовке судна к буровой или терминалу судно удерживается в заданном положении постоянной работой гребного винта на задний ход. Анализ наиболее типичных ситуаций показал, что при проведении расчетов достаточно рассмотреть три значения величины зазора H , что соответственно дает три значения значимого параметра $H/D = 0.333, 0.667, 1.0$, где D – диаметр движителя. При движении судна задним ходом также определяющим будет параметр H/D . При движении вперед кроме зазора между корпусом судна и грунта важным также окажется расстояние между осью струи (осью винта) и грунтом. Однако для единообразия представляется целесообразным оставить в качестве характерного параметр H . Это можно сделать потому, что расстояние от конца лопасти до днища судна мало по сравнению с диаметром гребного винта.

Вариации упора при проведении систематических расчетов принимались в достаточно широком диапазоне. Для режима швартовки основной диапазон от $T = 51.5$ кН до $T = 824$ кН (несколько расчетов при $T = 12.87$ и $T = 25.74$ кН), для режима движения от $T = 77.5$ кН до $T = 1240$ кН (как для случая заднего хода, так и для движения вперед). В случае движения судна нагрузка винта характеризуется коэффициентом нагрузки по упору -

$$C_{TA} = \frac{2T}{(\rho V_A^2 A_0)}, \text{ где } \rho - \text{плотность воды; } V_A - \text{скорость движения судна; } A_0 - \text{площадь}$$

диска движителя. Для режима швартовки коэффициент C_{TA} равен бесконечности и не может служить определяющим параметром задачи. В этом случае в качестве параметра, характеризующего интенсивность струи от винта, можно использовать среднюю скорость в диске гребного винта U_j . Абсолютно точное знание U_j при этом знать необязательно и можно воспользоваться формулами теории идеального движителя [4], связывающими значение скорости в струе с упором, развиваемым гребным винтом. Для режима швартовки, когда поступательная скорость судна равна нулю, для расчета вызванной скорости в

диске винта следует использовать следующую формулу: $U_j = \sqrt{\frac{T}{2\rho A_0}}$. При движении

$$\text{судна: } U_j = 0.5 \cdot V_A (\sqrt{1 + C_{TA}} - 1).$$

В качестве параметра, определяющего условия размыва, для данной задачи наиболее подходит отношение средней скорости в струе U_j к критической динамической скорости для данного грунта $U_{\tau 1}$, которая определяется по критическому касательному напряже-

нию по следующей формуле: $U_{\tau_1} = \sqrt{\tau_1/\rho}$. Таким образом, в качестве характерного параметра принимается отношение U_j/U_{τ_1} .

Для расчета характеристик течения вязкой жидкости использовался метод, основанный на решении полностью эллиптических уравнений Рейнольдса, замкнутых $k-\varepsilon$ моделью турбулентности. Для нахождения давления в методе использовался модифицированный SIMPLEC алгоритм. Подробно метод описан в работах [5, 6]. Уравнения движения вязкой несжимаемой жидкости в векторной форме можно представить в следующем виде:

$$\nabla \cdot (\mathbf{V}\mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\nu_e (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T) \right] + S_p,$$

а уравнение неразрывности: $\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$,

где $\nu_e = \nu_T + \nu$ – коэффициент эффективной вязкости; ν_T – коэффициент турбулентной вязкости; $\nu = 1/Rn$ – кинематический коэффициент вязкости; Rn – число Рейнольдса; $\nabla \cdot$ – оператор дивергенции; ∇ – оператор градиента; \mathbf{V} – вектор скорости; p – давление; S_p – источник массовых сил.

Для определения коэффициента турбулентной вязкости используется выражение $\nu_T = C_D f k^2/\varepsilon$, а сами величины k и ε определяются из решения уравнений переноса соответствующих величин:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}k) = \nabla \cdot \left[(\nu + \nu_T/\sigma_k) \nabla k \right] + G - \varepsilon,$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}\varepsilon) = \nabla \cdot \left[(\nu + \nu_T/\sigma_\varepsilon) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \cdot G/k \cdot \varepsilon - C_2 \cdot \varepsilon^2/k.$$

Здесь G описывает генерацию турбулентности за счет сдвига осредненного течения: $G = \nu_T (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T) \cdot \nabla \mathbf{V}$; $C_D = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$ – константы $k-\varepsilon$ модели турбулентности, а через функцию f (поправка Джонса–Лаундера) вводится поправка в коэффициент турбулентной вязкости на влияние турбулентного числа Рейнольдса.

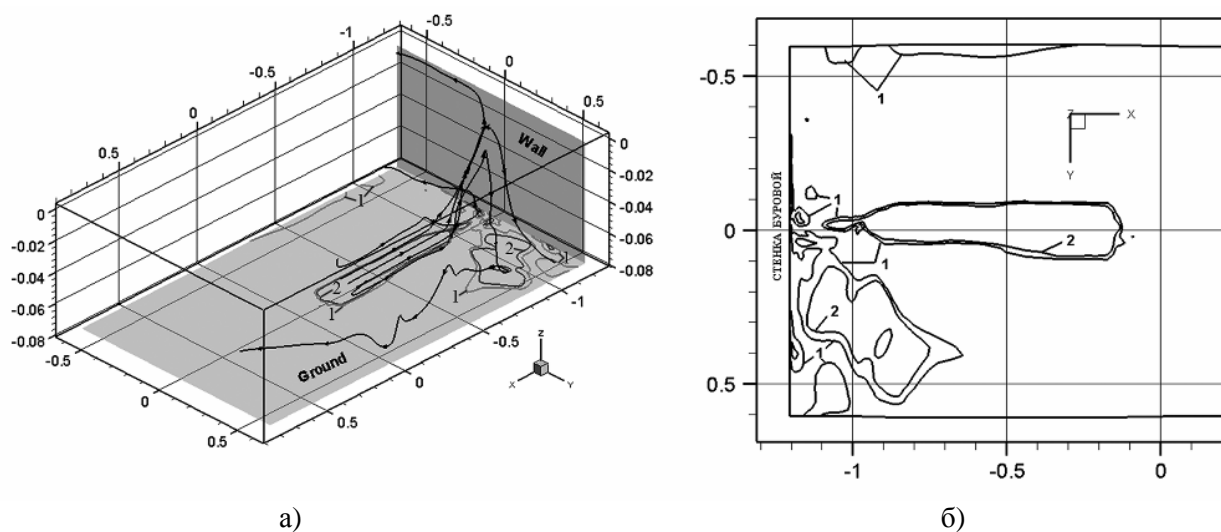
Учет винта осуществляется путем введения в уравнения Рейнольдса дополнительного источникового члена с плотностью объемных сил равной нулю всюду, кроме места расположения гребного винта [7]. Винт заменяется активным диском постоянной толщины ΔX_p . Плотности объемных сил \overline{fb}_x and \overline{fb}_θ ускоряют поток за винтом в продольном и тангенциальном направлениях. Величина плотности объемных сил определялась из условия обеспечения заданного упора и момента на винте при принятом законе распределения циркуляции по радиусу винта

$$\overline{fb}_x = \frac{2K_T \bar{\Gamma}(\bar{r})}{\pi J^2 \Delta X_p} \cdot \frac{1}{\int_{\bar{r}_0}^1 \bar{\Gamma}(\bar{r}) \bar{r} d\bar{r}}, \quad \overline{fb}_\theta = \frac{4K_Q \bar{\Gamma}(\bar{r})}{\pi J^2 \Delta X_p \bar{r}} \cdot \frac{1}{\int_{\bar{r}_0}^1 \bar{\Gamma}(\bar{r}) \bar{r} d\bar{r}}.$$

Здесь K_T и K_Q заданные коэффициенты упора и момента гребного винта, $J = V/nD$ – поступь гребного винта, V скорость движения судна, n частота вращения гребного винта, $D=2R$ – диаметр гребного винта, $\bar{r} = r/R$ – безразмерный радиус, \bar{r}_0 – безразмерный радиус ступицы. Распределение циркуляции по радиусу $\bar{\Gamma}(\bar{r})$ задается из поверочного расчета гребного винта в однородном потоке. Данные выражения для плотности объемных сил записаны в цилиндрической системе координат, связанной с винтом. Для получения компонент S_p в уравнениях движения они соответствующим образом трансформируются в используемую в методе расчетную систему координат.

Результаты расчета для режима удержания судна у буровой платформы. При швартовке судна к буровой носом для ее удержания на безопасном расстоянии от платформы используется работа движителя на задний ход. Струя от винта первоначально распространяется в основном в зазоре между грунтом и днищем судна, а затем выходит из-под корпуса и ударяется в платформу. Общий характер течения представлен на рис. 1, а, на котором показаны характерные линии тока и распределение касательных напряжений на грунте. Расчет был выполнен при $T = 824$ кН и $H = 2$ м. На рисунке все размеры даны в отношении к длине судна, $X = 0$ соответствует корме, а $X = -1$ - носу, $Y = 0$ – диаметральной плоскости судна. Линии тока выпущены в сечении $X = -0.3$ на высоте $1/3$ величины зазора между корпусом и грунтом. Изолинии касательного напряжения соответствуют напряжениям $\tau_1 = 1.16$ н/м² (при $\tau \leq \tau_1$ нет размыва), и $\tau_2 = 3.95$ н/м² (при $\tau \geq \tau_2$ есть размыв всех фракций). Между этими линиями происходит частичный размыв, при котором более крупные фракции не вымываются из грунта. На рисунке хорошо видно, зоны размыва вне проекции корпуса судна на грунт, которые формируются в результате воздействия на грунт струи, отраженной от платформы.

На рис.1, б для тех же условий представлены изолинии касательных напряжений равных критическим напряжениям для данного грунта. Данные результаты свидетельствуют, что существуют две основные зоны наиболее опасные с точки зрения размыва грунта. Первая – под корпусом судна, вторая – вблизи буровой. Под корпусом струя от винта распространяется в узком зазоре и в результате касательные напряжения, действующие на грунт, резко возрастают и достигают опасных величин. За пределами корпуса скорости в струе падают, и размыва грунта не происходит. Зона возможного размыва для частиц грунта всех размеров практически совпадает с границей отсутствия размыва. Вторая зона размыва формируется за счет отражения струи от буровой.



1 - $\tau_1 = 1.16$ Па; 2 - $\tau_2 = 3.95$ Па

Рис. 1. Картина течения при удержании пришвартованного к платформе судна:
а - линии тока; б - распределение касательного напряжения (зон размыва) на дне

Расчеты, выполненные при вариации величины зазора между корпусом судна и грунтом, а также при вариации упора гребного винта, показывают, что картины распределения касательных напряжений на грунте оказываются подобными, см. рис. 1. Также имеются две основные зоны, в которых касательные напряжения существенно выше, чем в среднем по пространству. По мере увеличения зазора и уменьшения упора винта зоны возможного размыва сокращаются. Вначале исчезает зона размыва вблизи платформы.

Касательные напряжения в этой области по-прежнему остаются выше, чем в остальном пространстве (за исключением области под корпусом), однако они оказываются меньше, чем напряжения, вызывающие размыв грунта. В дальнейшем исчезает зона размыва и под корпусом судна. В результате выполненных систематических расчетов были получены данные, позволяющие установить режимы работы движителя, при которых размыв не происходит. Обобщающий эти данные график будет приведен далее.

Результаты расчета для режима движения судна на мелководье. При движении судна на мелководье режимы движения задним ходом и движение вперед оказываются различными с точки зрения воздействия струи на грунт. Поэтому требуется их отдельное рассмотрение. Причем требуется рассмотрения обоих режимов, так как режим движения задним ходом достаточно вероятен. Это, во-первых, маневрирование при подходе к буровой или терминалу, во-вторых, движение танкера двойного действия (ДАТ) при наличии даже небольшого ледового покрова [8].

При движении судна задним ходом, как и при удержании судна у буровой, струя от винта первоначально распространяется в основном в зазоре между грунтом и днищем судна. Этим объясняется некоторое сходство распределения касательного напряжения для этих режимов. При движении задним ходом можно выделить две характерные зоны возможного размыва. Первая зона, где касательные напряжения достигают своего наибольшего значения, - это зона под корпусом судна. Эта зона оказывается весьма близкой, при больших нагрузках на винте, к той, что получается при рассмотрении задачи удержания судна у буровой. За пределами проекции контура днища на грунт величина зазора резко увеличивается, поток расширяется, и касательные напряжения спадают и размыв прекращается. Зона возможного размыва практически повторяет очертания днища судна. Картина зон возможного размыва приведена на рис. 2, а для зазора $H = 2$ м и упора $T = 1240$ кН. На рисунке движение судна справа налево.

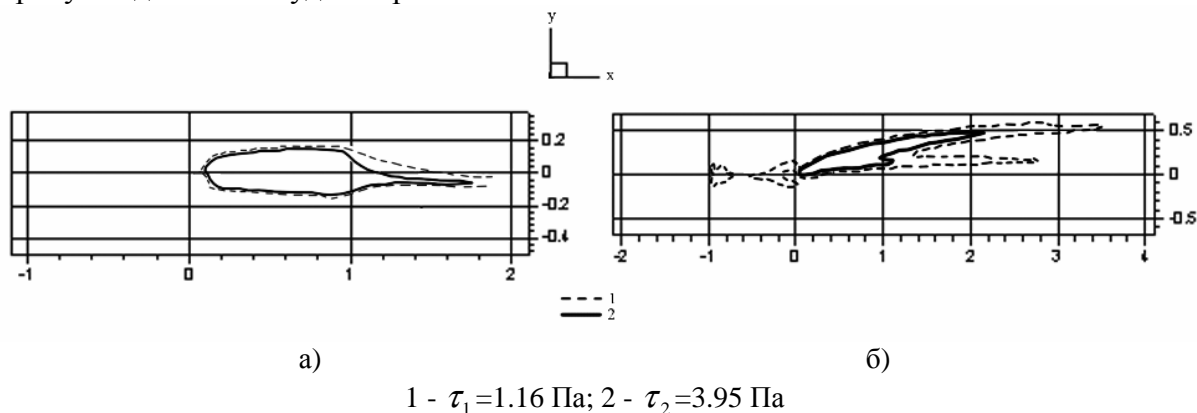


Рис. 2. Распределение касательного напряжения (зон размыва) при движении судна со скоростью 5 уз, $H = 2$ м, $T = 1240$ кН: а – задний ход; б – передний ход

По мере увеличения зазора конфигурация зоны размыва перестает совпадать с контуром днища. Это обусловлено тем, что при движении судна струя сносится набегающим потоком, и поэтому ее ширина оказывается меньшей, чем при работе на швартовом режиме. По мере увеличения зазора влияние сноса становится более заметным. При этом ширина зоны размыва определяется уже не шириной днища, а шириной струи; полоса размыва оказывается существенно уже. Взаимодействие струи от винта и набегающего потока вызывает появление второй зоны размыва – в следе за корпусом. Более узкая струя сохраняет способность к размыву на больших расстояниях от винта. Даже после выхода струи за корпус судна скорости в струе оказываются достаточными, чтобы вызвать размыв. Отсутствие каких-либо препятствий на пути распространения струи обеспечивает плавное изменение параметров струи в продольном направлении и, соответственно, плав-

ное уменьшение величины касательного напряжения, обусловленного взаимодействием струи и грунта.

При движении судна вперед картина течения будет отличной от режима движения задним ходом или удержания судна у буровой. Струя от винта сразу выходит в свободное пространство за корпусом судна. Затем, при малых нагрузках на винте она поднимается к свободной поверхности, и взаимодействие с грунтом оказывается весьма незначительным. При больших нагрузках струя деформируется, а затем расщепляется на две части, одна из которых взаимодействует с грунтом, а другая уходит к свободной поверхности. Взаимодействие придонной части струи с грунтом оказывается при этом значительным.

Характерной особенностью при больших нагрузках является отклонение придонной части струи и, соответственно, зон возможного размыва от направления движения судна. Это хорошо видно на рис. 2, б, на котором приведены зоны возможного размыва для случая движения при минимальном зазоре $H = 2$ м и максимальном упоре $T = 1240$ кН. На рисунке движение судна справа налево.

При уменьшении нагрузки на винт происходит уменьшение угла отклонения оси зоны размыва от направления движения. Уже при упоре 310 кН практически можно считать направление линии максимального размыва совпадающим с направлением движения судна для всех величин зазора. При движении прямым ходом с увеличением зазора области возможного размыва сокращаются. Темп падения максимального касательного напряжения на грунте при снижении упора и увеличении зазора для случая переднего хода существенно выше, чем для условий удержания судна у буровой и для случая движения задним ходом. Это вполне естественно, так как струя от винта распространяется в данном случае в существенно менее стесненных условиях.

Отличительной особенностью режима движения переднего хода является наличие двух небольших зон возможного размыва, приуроченных к точкам сопряжения форштевня и ахтерштевня с днищем. На рис. 2, б они расположены около $X = -0.9$ и $X = -0.2$, соответственно. Величина этих зон в основном зависит только от величины зазора между днищем и грунтом. Только при самых больших упорах гребного винта кормовая зона оказывается чувствительной к величине упора. Для рассмотренного в данной работе судна эти зоны размыва пропадают при величине зазора между корпусом и грунтом равном $H = 5.35$ м.

Обеспечение безопасных с точки зрения размыва режимов работы движителей судов. Анализ систематических расчетов, проведенных для условий швартовки судна к буровой, позволил определить область изменения параметров H/D и $U_j/U_{\tau 1}$, разделяющих условия, при которых будет происходить размыв или его не будет. Соответствующие результаты приведены на рис. 3. Здесь разделены условия отсутствия размыва непосредственно у буровой (рис. 3, а) и под корпусом (рис. 3, б). При выполнении условий, обеспечивающих положение точки $(H/D, U_j/U_{\tau 1})$ ниже кривой 1, не будет происходить размыва вообще, при нахождении точки $(H/D, U_j/U_{\tau 1})$ выше кривой 2 будет происходить вынос фракций грунта всех размеров. Между кривыми находится область, в которой будет происходить частичный размыв грунта, т.е. более крупные фракции не будут выноситься из грунта. Сочетание условий, обеспечивающих отсутствие размыва в целом по всей области, определяется графиком на рис. 3, б, так как именно область размыва под корпусом исчезает последней.

Из представленных на рис. 3, б материалов следует, что для любых практически значимых значений упора под корпусом судна будет происходить размыв грунта. В районе платформы также при большинстве значений упора будет происходить размыв грунта. Так как размывтый грунт осаждается в основном здесь же, в районе буровой и судна, то возможно образование искусственных отмелей с глубинами опасными для подходящих к буровой судов. Это говорит о необходимости засыпки вокруг платформы значительного

пространства более крупным материалом во избежание постоянного размыва грунта. В случае невозможности подобной операции требуется постоянный мониторинг глубин с тем, чтобы избежать посадки судна на образовавшуюся отмель.

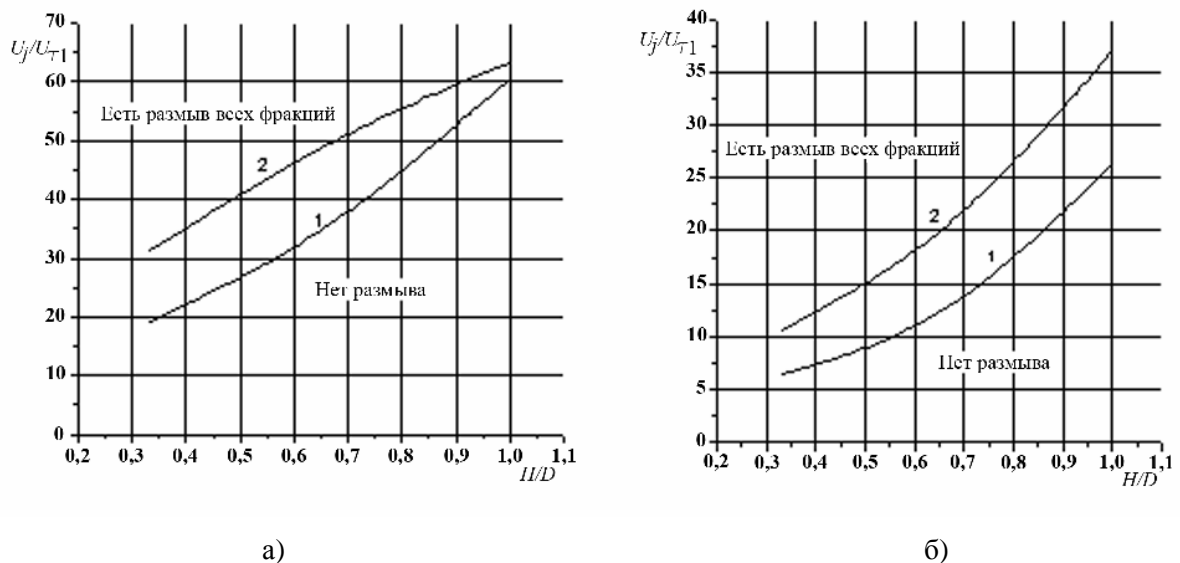


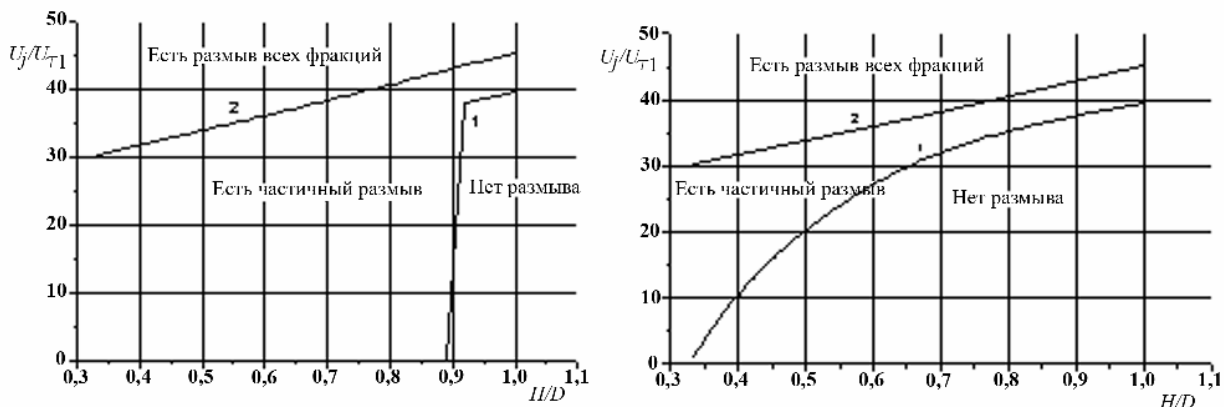
Рис. 3. Область изменения параметров H/D и U_j/U_{τ} обеспечивающих отсутствие размыва вне корпуса судна при удержании судна у платформ: а - вне корпуса судна; б - под корпусом судна

При рассмотрении движения судна на мелководье с точки зрения опасности размыва грунта следует различать движение передним и задним ходом. Эти режимы существенно различаются по условиям воздействия на грунт. Как показывают расчеты, в случае движения задним ходом при любой нагрузке на винт и при любом зазоре (из рассмотренных) будет происходить размыв грунта, хотя бы частичный.

При движении судна вперед при больших нагрузках на винте определяющим для размыва грунта оказывается струя от винта, а при малых нагрузках – течение, формирующееся за счет вовлечения воды в движение корпусом судна. Это приводит к необходимости отдельного определения условий для случая движения судна с малыми скоростями (5 уз) и предельно малыми (до 1 уз). В последнем случае размыв грунта уже будет определяться не движением корпуса, а только струей от винта. К случаю движения с предельно малыми скоростями примыкает и швартовный режим, при котором винт работает на передний ход. Это соответствует, например, режиму проведения швартовых испытаний в акватории судоверфи или движению ледокола в толстых ледяных полях.

Результаты систематических расчетов, выполненных для движения вперед, обобщены на рис. 4. На этом рисунке представлена область изменения параметров H/D и $U_j/U_{\tau 1}$, разделяющих условия, при которых будет происходить размыв или его не будет. На рис. 4, а приведены результаты для случая движения со скоростью 5 уз. На рис. 4, б приведены результаты для случая движения в условиях предельно малых скоростей или работы винта в обычном швартовном режиме.

При движении судна на мелководье размывтый грунт в основном переносится в направлении движения судна, что не представляет опасности для движения судна. Поднятый судном грунт будет после прохождения судна оседать по тому же курсу в продольном направлении. Таким образом, весь эффект от размыва будет заключаться в продольном перемещении грунта практически без изменения рельефа дна.



а)

б)

1 - $\tau_1=1.16$ Па; 2 - $\tau_2=3.95$ Па

Рис. 4. Область изменения параметров H/D и U_j/U_{τ} , обеспечивающих отсутствие размыва при движении судна на мелководье: а - скорость 5 уз; б - с предельно малыми скоростями (до 1 уз) или при работе винта на швартовном режиме

Опасность может возникать только в случае наличия значительных течений в акватории, ориентированных под некоторым углом к курсу судна. В этом случае при многократном прохождении судна одним и тем же курсом рельеф дна может поменяться настолько, что наличие искусственно сформированных подъемов дна может представлять опасность для движения судов. Особенно вероятен такой процесс при движении танкера ДАТ по судоходному каналу, проложенному на мелководье. При наличии практически любого ледяного покрова танкер ДАТ будет двигаться кормой вперед. Размыв грунта при этом будет происходить даже при малых величинах нагрузки на винт. При прохождении одним курсом многократно и при наличии сноса размываемого грунта течением может возникнуть опасная ситуация.

При больших нагрузках на движитель при движении вперед наблюдается отклонение направления размыва и переноса размываемого грунта от направления движения. Эта ситуация представляется наиболее опасной. В случае бокового выноса грунта при неоднократном проходе судна по одному и тому же курсу возможно значительное изменение рельефа дна. Наибольший интерес для обеспечения безопасности плавания оказывается информация об угле отклонения оси размыва от курса судна. Величина этого угла не зависит от свойств грунта, поэтому в качестве определяющей величины необходимо использовать коэффициент нагрузки по упору C_{TA} . На рис. 5 приведены области изменения параметров H/D и C_{TA} , обеспечивающих отклонение линии размыва от курса судна на угол не больше заданного. Для точного определения безопасного угла отклонения направления размыва от направления движения судна требуется рассмотрение процессов переноса и осаднения грунта, а также знание скорости выравнивания рельефа дна за счет течений. Получение подобной информации в рамках данной работы не было предусмотрено, поэтому расчетные зависимости приведены для ряда углов. Анализ возможных траекторий выноса грунта показал, что безопасными можно признать углы отклонения не более 5° . В этом случае вынос размываемого грунта за пределы полосы, ограниченной шириной корпуса, будет производиться в объемах, которые вряд ли будут угрожать безопасности движения. При углах меньших 2° размыв грунта будет осуществляться в основном в пределах полосы, ограниченной шириной судна. Поэтому в тех случаях, когда заранее известно о многократных проходах одним и тем же курсом, предельный угол отклонения следует ограничить величиной 2° . Подобный режим можно, по всей видимости, считать безопасным.

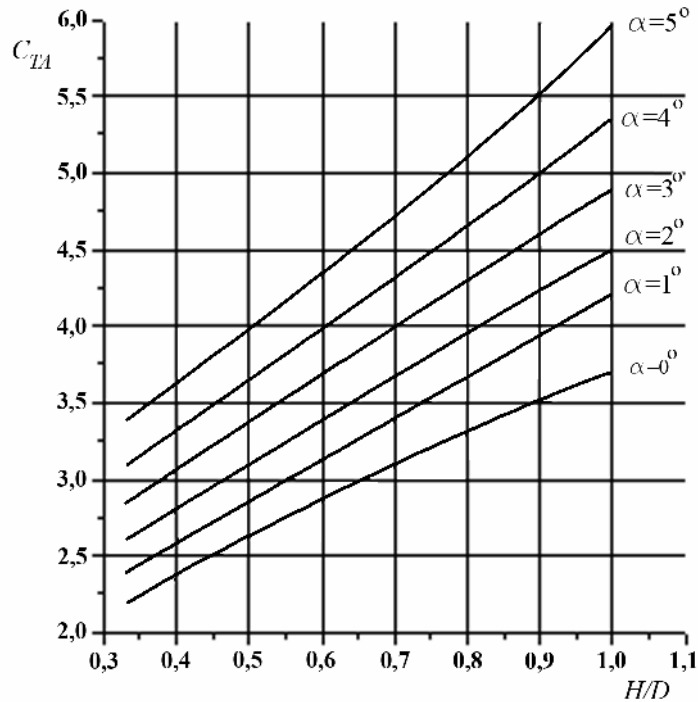


Рис. 5. Область изменения параметров H/D и C_{TA} , обеспечивающих отклонение линии размыва от курса судна на угол не больше заданного: $\alpha = 2^\circ$ - предпочтительный, $\alpha = 5^\circ$ - допустимый

При движении со скоростью 5 уз на чистой воде, даже в случае предельного мелководья, угол отклонения оси размыва от курса судна будет практически нулевым. Наличие же ледяного покрова существенно ухудшает ситуацию. В этих условиях при многократном прохождении канала вдоль его края может оказаться намытым вал достаточно большой высоты. При смещении ледового поля и, соответственно канала, канал может оказаться над этим валом и при проходе судна по каналу возможно касание корпусом этого вала. Возможность возникновения подобной ситуации показывает, что необходимо ограничение предельно допустимых упоров, развиваемых винтом, в случае движения судна на мелководье. Кроме того, необходим мониторинг глубин акватории вокруг буровой или терминала, с тем, чтобы при подходе к ним танкеров в зимних условиях исключить возможность посадки на мель в случае сноса канала за счет сдвижки ледового поля в неблагоприятном направлении.

Предлагаемый метод расчета течения, формирующегося при движении судна на мелководье и при выполнении швартовки судна к буровой платформе, позволяет находить размеры и конфигурацию зон возможного размыва грунта. Выполненные в работе систематические расчеты позволили разработать рекомендации для обеспечения безопасных с точки зрения размыва грунта режимов работы движителей судов в зависимости от глубины фарватера. Для более точной оценки условий отсутствия размыва или для определения конфигурации зон возможного размыва представляется необходимым проведение в каждом конкретном случае соответствующих расчетов.

Summary

Authors consider the problem of soil scouring due to the effect of the ship propeller wake. Numerical simulation of the viscous flow is based on Reynolds equations closed with the help of the $k - \epsilon$ turbulence model. The effects of the propeller are introduced by additional source terms incorporated in Reynolds equations. The potential erosion areas are found by comparing the computed shear stresses

on the soil against the ultimate shear stresses that initiate the erosion process. The paper discusses several scenarios associated with ship operation in shallow waters. The numerical technique was used to establish dimensions and configurations of possible soil erosion patches and those conditions (depth, propeller loading, etc.), that are safe in terms of not causing bottom scouring.

Литература

1. *Мартышов Г.Г.* Что воздействует на величину морских рыбных ресурсов? // Вестник Российской академии наук. 2004. Т. 74. № 8. С.690-695.
2. *Леви И.И.* Моделирование гидравлических явлений. Л.: Энергия, 1967.
3. *Чоу В.Т.* Гидравлика открытых каналов. М.: Изд. лит. по строительству, 1969.
4. *Артюшков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А.* Судовые движители. Л.: Судостроение, 1988.
5. *Chicherin I.A., Lobachev M.P.* Application of RANS-CODE to Ship Designing Practical Problem // International Maritime Association of Mediterranean IX Congress IMAM'2000: Proceedings: 2-6 April 2000: V.III: Session I. Napoli. 2000. P.1-8.
6. *Лобачев М.П., Чичерин И.А.* Оценка масштабного эффекта поля скоростей и вязкостного сопротивления корпуса судна на основе решения уравнений Рейнольдса // Проблемы масштабного эффекта в гидродинамике: Сб. статей к 100-летию со дня рождения Ю.В.Кривцова. СПб. 2001. С.19-32.
7. *Lobachev M.P., Tchitcherine I.A.* The Full-Scale Resistance Estimation for Podded Propulsion System by RANS Method // Proc. of International Symposium on Ship Propulsion. Saint-Petersburg. Russia. 2001. P.39-44.
8. *Sasaki N. et al.* Full scale performance of double acting tankers «Tempera & Mastera» // 1st Int. Conf. On Technological Advances in Podded Propulsion. Newcastle (UK), 2004.

Статья поступила в редакцию 13.11.2007 г.