

УДК 622.242.4

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН С ПОДВОДНЫМ ТРУБОПРОВОДОМ

В. М. КУШНИР\*, С. В. ФЕДОРОВ\*\*

\* Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь

\*\* Севастопольский Национальный Технический университет

Получено 15.11.2002 ◊ Пересмотрено 16.02.2003

Рассматривается краевая задача взаимодействия поля поверхностных гравитационных волн с подводным трубопроводом при произвольном зазоре между поверхностью дна и трубой. Используются приближения потенциального обтекания и линейных волн малой амплитуды (волн Эйри). Выполнены численные эксперименты для расчета полей волновых скоростей и давления при различных значениях фазы волнового возмущения и относительного зазора между трубопроводом и поверхностью дна. Численные эксперименты показали, что при определённых величинах относительного зазора и чисел Келегана-Карпентера наблюдается локальное увеличение (на 30...35%) скорости обтекания трубопровода. Этот же диапазон относительного зазора и чисел Келегана-Карпентера соответствует аномальным величинам горизонтальных и вертикальных гидродинамических коэффициентов волнового обтекания трубопровода по данным лабораторных экспериментов [1].

Розглядається краєва задача взаємодії поля поверхневих хвиль з підводним трубопроводом при довільному зазорі між поверхнею дна та трубою. Використовуються наближення потенційного обтікання та лінійних хвиль малої амплітуди (хвиль Ейрі). Виконані чисельні експерименти для розрахунку полів хвильових швидкостей та тиску при різних значеннях фази хвильового збурення та відносного зазору між трубопроводом та поверхнею дна. Чисельні експерименти показали, що при визначених значеннях відносного зазору та чисел Келегана-Карпентера спостерігається місцеве збільшення (на 30...35%) швидкості обтікання трубопроводу. Цей же діапазон відносного зазору та чисел Келегана-Карпентера відповідає аномальним значенням горизонтальних та вертикальних гідродинамічних коефіцієнтів хвильового обтікання трубопроводу на підставі лабораторних експериментів [1].

The boundary values problem of the interaction between field of the surface gravity waves with the underwater pipeline at arbitrary gap between seabed surface and pipeline is considered. The potential flow and linear waves of small amplitudes approximations (Airy waves) are used. The numeral calculations for wave velocities and pressure at different values of the wave perturbation phases and relative gap between pipeline and seabed surface are carried out. The numeral calculations are shown that the local velocity increase (30...35%) are observed for certain values of the relative gap and Keulegan-Carpenter numbers. This range of the relative gap and Keulegan-Carpenter numbers corresponds to the anomalous values of the drag and lifting hydrodynamic coefficients of the wave flow around the pipeline on the laboratory tests [1].

### ВВЕДЕНИЕ

Среди основных и вспомогательных гидротехнических средств, используемых при освоении морских энергетических ресурсов на континентальном шельфе, морские трубопроводы занимают одно из ведущих мест. За годы разработки шельфовой зоны морские трубопроводы зарекомендовали себя как наиболее эффективное средство транспортировки углеводородных энергоносителей на расстояния до 5 тыс. км. Высокая стоимость морских трубопроводов (в среднем до 3 млн. дол./км), а также потенциальная опасность экологической катастрофы при аварии накладывают особые требования к обеспечению их безопасности.

Анализ опыта эксплуатации морских подводных трубопроводов, проведенный в [2], показал, что на сегодняшний день нет единых требований по прокладке трубопроводов и конкретного подхода для обеспечения их безотказной работы в течение длительного времени.

В настоящее время существует тенденция к заглублению трубопроводов в грунт для исключения или уменьшения влияния таких внешних факторов как лёд, интенсивные придонные течения, якоря, тралы и т.п. Тем не менее, по ряду экономических и экологических причин многие страны, ведущие жёсткую политику относительно заглубления трубопроводов, вынуждены проводить их прокладку непосредственно по поверхности дна. А это, в свою очередь, налагает дополнительные и ещё более жёсткие требования к обеспечению безопасной эксплуатации трубопроводов, проложенных непосредственно по морскому дну.

Так, только в Северном море за период с 1969 по 1986 годы произошло шесть крупных аварий подводных трубопроводов, следствием которых были значительные выбросы нефтепродуктов в морскую среду. 70% этих аварий связано с воздействием жесточких штормов. В одном случае произошло всплытие нефтепровода, подмытого придонными течениями.

Одной из первостепенных задач, которые приходится решать при проектировании морских трубопроводов, является изучение их гидродинамического взаимодействия с морской средой. Особое внимание при этом уделяется изучению такого взаимодействия в прибрежных районах, где придонные течения, индуцированные штормовыми поверхностными волнами, имеют значительные скорости.

Общую проблему взаимодействия подводного трубопровода с придонным волновым течением можно условно разделить на следующие взаимосвязанные между собой аспекты:

1. Определение механических горизонтальных и вертикальных знакопеременных нагрузок на трубопровод и их комплексное влияние на плетть трубопровода при прокладке, а также на устойчивость против всплытия во время эксплуатации.

2. Изучение деформации поля волнового течения при обтекании подводного трубопровода, ее влияние на размыв грунта под трубой и, следовательно, на возможность аварии из-за провисания и вибрации участков трубопровода [3–8].

3. Изучение вертикальной турбулентной диффузии при обтекании трубы для прогноза возможного распространения продуктов транспортировки при утечках или аварии трубопровода [9].

Изучение механических нагрузок на подводные трубопроводы было начато в конце 40-х годов прошлого столетия и ведется в настоящее время методами лабораторных и натурных экспериментов [1, 10]. В основе таких исследований лежит модель Морисона, согласно которой горизонтальная и вертикальная составляющие механической нагрузки на трубопровод определяются следующими соотношениями:

$$Q_{xw} = 0.5\rho DC_{xw}V|V| + 0.25\rho\pi D^2 C_i \frac{dV}{dt},$$

$$Q_{zw} = 0.5\rho DC_{zw}V^2, \quad (1)$$

где  $D$  – диаметр трубопровода;  $C_{xw}, C_i, C_{zw}$  – коэффициенты лобового сопротивления, инерционной компоненты и подъёмной силы соответственно;  $V$  – скорость обтекания.

Большое количество различных исследований было посвящено развитию модели Морисона [11–13] и определению гидродинамических коэффициентов  $C_{xw}, C_i, C_{zw}$ . Так, по данным [14] коэффициент  $C_{xw} = 1.4$  при  $10^4 \leq Re \leq (2.3) \cdot 10^5$ . Если труба лежит на дне и имеет шероховатую поверхность, то  $C_{xw} = 1.33$ , а коэффициент  $C_i = 2$ . В [15] систематизированы результаты определения различными авторами коэффициентов сопротивления

$C_{xw}, C_i, C_{zw}$  для случая воздействия волновых нагрузок на подводный трубопровод. Согласно [15], диапазон значений этих коэффициентов имеет следующие границы: нижний предел –  $C_{xw}, C_i, C_{zw} = 1.3$ ; верхний предел –  $C_{xw} = 4.48, C_i = 3.3, C_{zw} = 4.48$ . Рекомендуется использовать следующие величины  $C_{xw} = 3.1, C_i = 3.0, C_{zw} = 3.14$ . Таким образом, можно отметить значительную неопределённость в величинах коэффициентов сопротивления, которые приведены в указанных работах. В этих оценках также не учитывается влияние положения трубы относительно поверхности дна, хотя оно может быть существенным.

Более поздние исследования показали, что гидродинамические коэффициенты горизонтальных  $C_{xw}$  и вертикальных  $C_{zw}$  сил, а также силы инерции  $C_i$  сложным образом зависят от чисел Келегана-Карпентера, от относительного зазора между трубой и дном  $e/D$  и от относительной глубины  $H/D$  [1]. Особенность полученных результатов состоит в значительном разбросе оценок величин  $C_d, C_m$  и  $C_i$ . Они изменяются в пределах от 0.5 до 3; от 1.5 до 4; от 0 до 3 соответственно при одинаковых величинах чисел Келегана-Карпентера  $K$ , относительного зазора  $e/D$  и относительной глубины  $H/D$ . Причина такого значительного разброса указанных величин остается неясной до настоящего времени.

Экспериментальные исследования особенностей обтекания трубопровода однородным и волновым потоками вблизи плоской границы выявило достаточно сложный характер обтекания, сопровождающийся формированием областей положительных и отрицательных перепадов скорости и давления, а также возникновением и срывом вихрей из-за близости дна [16–20]. При этом может происходить интенсивный размыв грунта в зоне обтекания трубопровода [5, 21–25]. При удалении трубы от поверхности дна распределение давления вокруг нее становится все более симметричным относительно фронтальной точки застоя. При обтекании трубопровода волновым потоком более сложная картина наблюдается вследствие эффектов инерции и отражения [26, 27].

Таким образом, можно констатировать многие неясные моменты динамического взаимодействия подводных трубопроводов с придонными волновыми течениями. К такому же выводу можно прийти на основе анализа рекомендаций различных квалификационных организаций по мерам обеспечения безопасной эксплуатации подводных магистральных трубопроводов, так как эти рекомендации в значительной степени противоречивы.

Одним из значимых аспектов указанной пробле-

мы является создание гидродинамических моделей обтекания подводных трубопроводов придонным волновым течением при произвольном зазоре между трубой и поверхностью дна. Модели такого типа необходимы для вычисления особенностей волнового обтекания трубопровода и поля давления, а также для оценок возможного отличия скорости непосредственно на трубопроводе от скорости естественного волнового течения вблизи дна, которая обычно используются в гидродинамических расчетах. Гидродинамические модели такого типа широко представлены в научных публикациях применительно к подводным объектам различного типа [28–32]. В отличие от таких исследований, целью настоящей работы является создание гидродинамической модели обтекания подводного трубопровода придонными волновыми течениями при различных значениях относительного зазора  $\delta/D$  между трубой и дном и относительной глубины  $H/D$ , а также выполнение численных экспериментов для расчетов полей скорости течения и давления в зоне обтекания. Задача решается в приближении потенциального волнового обтекания и линейной теории поверхностных волн малой амплитуды (волн Эри). Поле гравитационных волн считается невозмущенным на боковых границах расчетной схемы; на поверхности моря выполняется граничное условие для гравитационных волн; на дне и на стенках трубопровода задано условие непротекания.

## 1. МОДЕЛЬ

Расчетная схема решения задачи волнового обтекания подводного трубопровода приведена на рис. 1.

Горизонтальная  $u(x, y)$  и вертикальная  $v(x, y)$  составляющие волновой скорости течения выражаются через потенциал  $F(x, y, t)$  поля течения следующим образом:

$$U = -\frac{\partial F}{\partial x}, \quad V = -\frac{\partial F}{\partial y}, \quad (2)$$

где ось  $y$  направлена от поверхности воды вертикально вверх, ось  $x$  образует с ней правостороннюю прямоугольную декартову систему координат.

Подставляя соотношения (2) в уравнение неразрывности, получаем уравнение плоских потенциальных волн

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

со следующими граничными условиями:

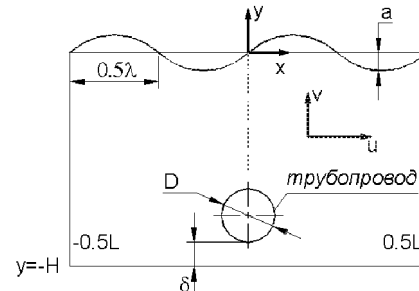


Рис. 1. Расчетная схема краевой задачи взаимодействия поверхностных волн с подводным трубопроводом

(i). Непротекание на дне и на поверхности трубопровода:  $\frac{\partial F}{\partial y} = 0$  (при  $y = -H$ ),  $\frac{\partial F}{\partial n} = 0$  (на поверхности трубы,  $n$  - направление нормали);

(ii). Для рассматриваемого типа линейных поверхностных волн малой амплитуды (волн Эри) на жидких боковых границах расчетной схемы  $x = \pm 0,5L$  должны выполняться следующие условия:  $F(x = -0,5L) = F(x = 0,5L)$  и  $\frac{\partial F(x = -0,5L)}{\partial x} = -\frac{\partial F(x = 0,5L)}{\partial x}$  при всех значениях  $y$  [33].

Так как  $F(x, y, t) = Re[A(y)e^{i(\omega t - kx)}]$ , то

$$F(x = \pm 0,5L, y, t) = \frac{a\lambda ch[k(H + y)]}{Tsh(kH)} \times \cos(\omega t - kx) \quad \text{при } -H < y < 0, \quad (4)$$

где  $\omega = 2\pi/T$  - угловая частота;  $k = 2\pi/\lambda$  - волновое число;  $a$  - амплитуда волны;  $L$  - горизонтальный размер расчетной области;

(iii). Условие на поверхности моря:

$$F(x, y = 0, t) = \frac{a\lambda ch(kH)}{Tsh(kH)} \cos(\omega t + kx), \quad (5)$$

где  $-0,5L < x < 0,5L$ .

В безразмерной форме уравнение (3) и граничные условия записываются в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 F^*}{(\partial x^*)^2} + \frac{\partial^2 F^*}{(\partial y^*)^2} = 0 \quad (6)$$

на поверхности дна и трубы:

$$\frac{\partial F^*(x^*, y^* = -H^*, t^*)}{\partial y^*} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial F^*}{\partial n} = 0;$$

$$F^* \left[ x^* = \pm \frac{L}{2D}, y^*, t^* \right] = \frac{\operatorname{ch} \left[ \frac{2\pi D}{\lambda} (H^* + y^*) \right]}{\operatorname{sh} \left( \frac{2\pi D}{\lambda} H^* \right)} \times \cos \left[ 2\pi \left( t^* - \frac{D}{\lambda} x^* \right) \right] \quad (8)$$

при  $-H^* \leq y^* \leq 0$ ;

$$F^*(x^*, y^* = 0, t^*) = \frac{\operatorname{ch} \left[ \frac{2\pi D}{\lambda} (H^* + y^*) \right]}{\operatorname{sh} \left( \frac{2\pi D}{\lambda} H^* \right)} \times \cos \left[ 2\pi \left( t^* - \frac{D}{\lambda} x^* \right) \right] \quad (9)$$

при  $-0.5L/D \leq x^* \leq 0.5L/D$ ;

где  $x^* = x/D$ ,  $y^* = y/D$ ,  $H^* = H/D$ ,  $t^* = t/T$ ,  $F^* = TF/(a\lambda)$ .

Уравнение неразрывности (6), решение которого удовлетворяет указанным граничным условиям, аппроксимируется следующим разностным уравнением:

$$\begin{aligned} & \frac{F^*(x_0^* + h, y_0^*) + F^*(x_0^* - h, y_0^*)}{h^2} - \\ & - \frac{2F^*(x_0^*, y_0^*)}{h^2} - \frac{2F^*(x_0^*, y_0^*)}{k^2} + \\ & + \frac{F^*(x_0^*, y_0^* - k) + F^*(x_0^*, y_0^* + k)}{k^2} = 0, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $h, k$  - безразмерные величины шага сетки по горизонтали и вертикали соответственно.

Решение разностного уравнения (10) выполнено итерационным методом Либмана. Сходимость решения считается удовлетворительной, если значение потенциала в произвольной точке с координатами  $x^*, y^*$  при  $i$ -той итерации не превышает значения потенциала в той же точке при  $i-1$  итерации с заданной точностью  $\varepsilon$ . Сходимость решения уравнения (10) достигается за 2610 циклов при величине  $\varepsilon$ , равной  $10^{-6}$ .

Безразмерные значения горизонтальной  $u^*$  и вертикальной  $v^*$  волновой скорости выражаются следующим образом:

$$\begin{aligned} u^* &= -\frac{\partial F^*}{\partial x^*} = u \frac{TD}{a\lambda}, \\ v^* &= -\frac{\partial F^*}{\partial y^*} = v \frac{TD}{a\lambda}. \end{aligned} \quad (11)$$

Определение длины волны выполнено на основе известного дисперсионного соотношения:

$$\omega = gk \operatorname{th}(kH) = \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 =$$

$$= \frac{2\pi g}{\lambda} \operatorname{th} \left( \frac{2\pi D}{\lambda} H^* \right). \quad (12)$$

Для вычисления давления использованы уравнения Навье-Стокса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{\partial P}{\rho \partial x}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= -\frac{\partial P}{\rho \partial y} - g \end{aligned} \quad (13)$$

со следующими граничным условиям:

(i) на боковых границах:

$$\begin{aligned} \frac{P(x = \pm 0.5L, y, t)}{\rho} &= \frac{g \operatorname{ach}[k(H+y)]}{\operatorname{ch}(kH)} \times \\ &\times \sin(-\omega t + kx) - gy \end{aligned} \quad (14)$$

при  $-H \leq y \leq 0$ ;

(ii) на свободной поверхности:

$$\frac{P(x, y = 0, t)}{\rho} = ga \sin(\omega t + kx), \quad (15)$$

где  $-0.5 < x < 0.5L$ .

В безразмерной форме уравнения (13) и граничные условия (14), (15) записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial u^*}{\partial y^*} &= -\frac{\partial P^*}{\partial x^*}, \\ \frac{\partial v^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial v^*}{\partial x^*} + v^* \frac{\partial v^*}{\partial y^*} &= -\frac{\partial P^*}{\partial y^*} - 1; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} P^* \left( x^* = \pm \frac{L}{2}, y^*, t^* \right) &= -\frac{\operatorname{ch} \left[ \frac{2\pi D}{\lambda} (H^* + y^*) \right]}{a^{-1} y^* D \operatorname{ch} \left( \frac{2\pi D}{\lambda} H^* \right)} \times \\ &\times \sin 2\pi \left( t^* - \frac{D}{\lambda} x^* \right) + 1, \end{aligned} \quad (17)$$

где  $-H^* \leq y^* \leq 0$ ;

$$\begin{aligned} P^*(x^*, y^* = 0, t^*) &= \frac{-a}{y^* D} \sin 2\pi \left( t^* - \frac{D}{\lambda} x^* \right), \\ -\frac{0.5L}{D} \leq x^* &\leq \frac{0.5L}{D}, \end{aligned} \quad (18)$$

$P^* = P/(\rho g D y^*)$ .

Таким образом,  $P^*$  представляет собой отношение действительного давления к величине гидростатического давления в этой же точке.

Дифференцируя первое уравнение (16) по  $x^*$ , а второе - по  $y^*$  и затем, складывая их, находим:

$$\frac{\partial^2 P^*}{(\partial x^*)^2} + \frac{\partial^2 P^*}{(\partial y^*)^2} = -Q^*(u^*, v^*, x^*, y^*, t^*), \quad (19)$$

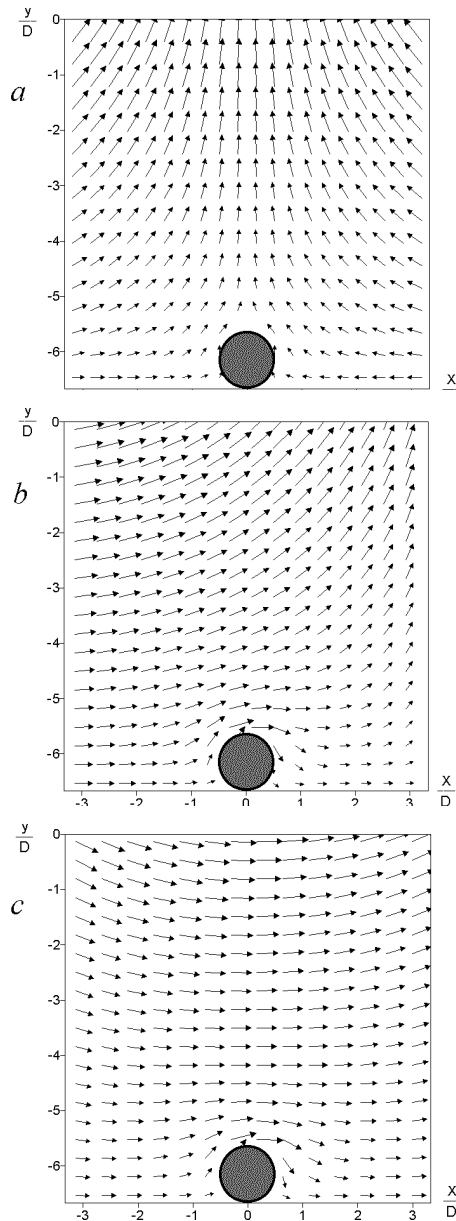


Рис. 2. Результаты численного расчета поля волновых течений при значениях фазы поверхностной волны:  $a - \omega t = 0^\circ$ ,  $b - \omega t = 45^\circ$  и  $c - \omega t = 90^\circ$  при обтекании трубопровода, лежащего на дне без зазора

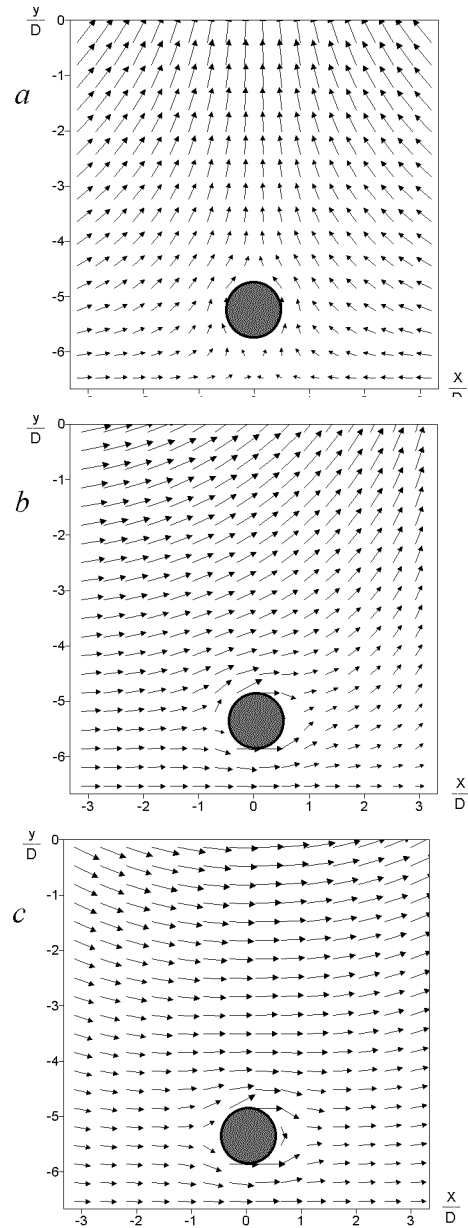


Рис. 3. Результаты численного расчета поля волновых течений при значениях фазы поверхностной волны:  $a - \omega t = 0^\circ$ ,  $b - \omega t = 45^\circ$  и  $c - \omega t = 90^\circ$  при обтекании трубопровода, расположенного от дна на расстоянии  $\delta/D = 0.5$

где  $Q^*(u^*, v^*, x^*, y^*, t^*)$  – правая часть уравнения (19), которая определяется для каждой точки расчетной схемы в результате численного решения уравнения (6).

При расчетах поля давления в качестве аппроксимационной формулы использована следующая

зависимость:

$$2(h^2 + k^2)P^*(x_0^*, y_0^*) = k^2[P^*(x_0^* + h, y_0^*) + P^*(x_0^* - h, y_0^*)] + h^2[P^*(x_0^*, y_0^* - k) + P^*(x_0^*, y_0^* + k) - h^2 k^2 Q^*(x_0^*, y_0^*)], \quad (20)$$

Табл. 1. Параметры волн при скорости ветра 40 м/с

$H, \text{ м}$	$h_{\text{ср}} = 2a, \text{ м}$	$T, \text{ с}$	$\lambda, \text{ м}$	$V_m, \text{ м/с}$	$\text{Re} \cdot 10^{-5}$	$\text{Sh}$	$K$
5	1.41	4.40	30	0.84	8.4	0.27	3.7
10	2.14	5.70	54	0.81	8.1	0.22	4.6
15	2.72	6.54	73	0.78	7.8	0.20	5.1
20	3.24	7.26	92	0.76	7.6	0.18	5.5
25	3.70	7.86	110	0.75	7.5	0.17	5.9
30	4.13	8.40	127	0.74	7.4	0.16	6.2

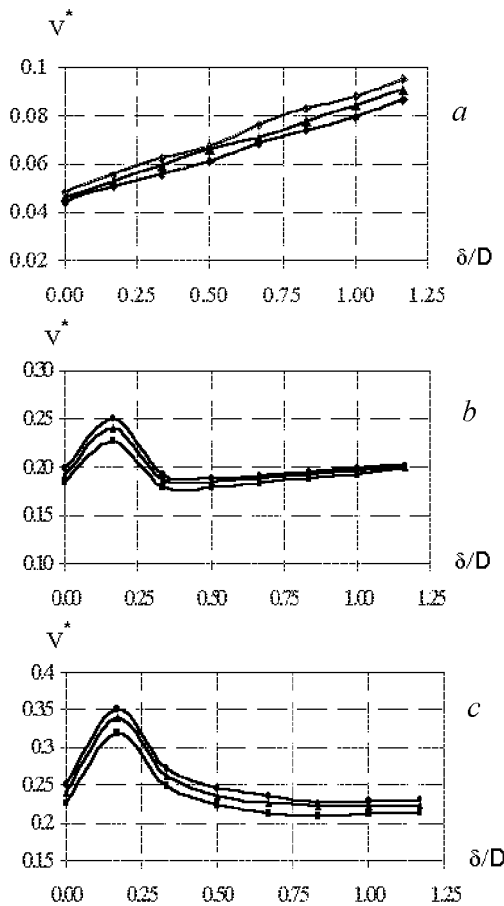


Рис. 4. Зависимости  $V_{max}^* = f(\delta/D)$  при различных значениях фазы поверхностных волн:  $a - 2\pi t^* = 0^\circ$ ,  $b - 2\pi t^* = 45^\circ$ ,  $c - 2\pi t^* = 90^\circ$  соответственно. Верхняя, средняя и нижняя кривые соответствуют значениям  $V_w^*$ , равным 41.78, 31.40 и 21.75

где

$$Q^*(x_0^*, y_0^*) = [u^{*2}(x_0+h, y_0) + u^{*2}(x_0-h, y_0) - 2u^{*2}(x_0, y_0) + v^{*2}(x_0, y_0+k) + v^{*2}(x_0, y_0-k) - 2v^{*2}(x_0, y_0)] + 0.5[u^*(x_0+h, y_0+k)v^*(x_0+h, y_0+k) - u^*(x_0-h, y_0+k)v^*(x_0-h, y_0+k) + u^*(x_0-h, y_0-k) \times$$

$$\times v^*(x_0-h, y_0-k) - u^*(x_0+h, y_0-k)v^*(x_0+h, y_0-k)].$$

Решение разностного уравнения (20) выполнено итерационным методом Либмана по схеме, аналогичной решению уравнения для скоростей течения.

## 2. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

При выполнении численных расчетов использовались параметры экстремальных поверхностных волн, соответствующие скорости штормового ветра в диапазоне 30...50 м/с.

Выше, в табл. 1, приведены параметры таких волн, вычисленные для различной глубины на основе полуэмпирических.

В табл. 1 введены следующие обозначения:  $H$  – глубина моря;  $h_{\text{ср}}$  – средняя высота волны;  $T$  – средний период, с;  $\lambda$  – длина волны;  $V_m$  – амплитуда придонной волновой скорости течения;  $\text{Re}$ ,  $\text{Sh}$ ,  $K$  – соответственно числа Рейнольдса, Струхали и Келегана-Карпентера.

Численные расчеты проводились для глубины моря 6 м. При этом скорость ветра изменялась в диапазоне 30...50 м/с, диаметр трубопровода  $D$  был принят равным 0.9 м. Фазовые углы волновых возмущений ( $\omega t = 2\pi t^*$ ), относительный зазор между трубопроводом и поверхностью дна ( $\delta/D$ ) и относительная ширина расчетной области ( $L/D$ ) изменялись в широких пределах. Максимальное значение ( $L/D$ ) было равно нескольким длинам волн, затем оно уменьшалось до величины, при которой начинали проявляться возмущения скорости и давления при обтекании трубопровода ( $L/D = 7$ ). При вариации величины ( $L/D$ ) структура поля волновых течений и давления не изменялась.

На рис. 2. показаны результаты численного расчета поля волновых течений при трех характерных значениях фазы поверхностной волны при обтекании трубопровода, находящегося на дне без зазора. На этих рисунках, как и на рис. 3, показана часть расчетной области с целью увеличения

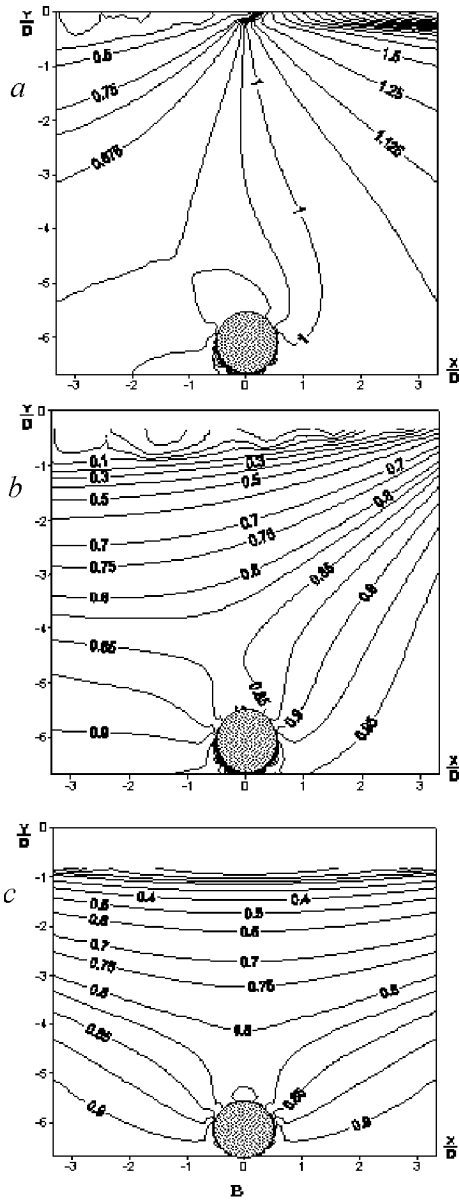


Рис. 5. Распределение безразмерного давления при положении трубы на дне при различных фазах волны:  $a - \omega t = 0^\circ$ ,  $b - \omega t = 45^\circ$  и  $c - \omega t = 90^\circ$

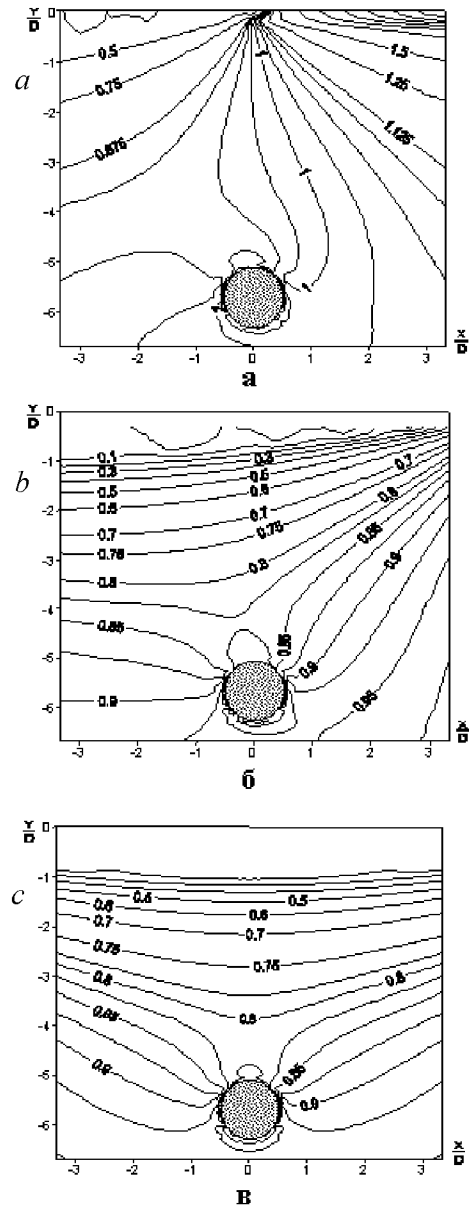


Рис. 6. Результаты численного расчета поля давлений при значениях фазы поверхностной волны:  $a - \omega t = 0^\circ$ ,  $b - \omega t = 45^\circ$  и  $c - \omega t = 90^\circ$  при обтекании трубопровода, расположенного от дна на расстоянии  $\delta/D = 0.5$

пространственного разрешения.

При фазовом угле  $\omega t = 0^\circ$  волновое течение является вертикальным и в этом случае его скорость вблизи дна незначительна. При фазовом угле  $\omega t = 90^\circ$ , когда волновое течение становится горизонтальным, на верхней поверхности трубопровода наблюдается некоторое увеличение скорости.

Картина обтекания трубопровода резко изменяется, когда между трубой и дном имеется зазор.

Вычисленное волновое поле скоростей для такого случая (зазор равен  $0.83D$ ) представлено на рис. 3.

На нижней кромке трубопровода происходит интенсификация скорости волнового течения, причем величина скорости значительно превышает скорость волнового течения на поверхности моря. Соответствующая зависимость безразмерной максимальной скорости  $v_{max}^* = v_{max}(TD/(a\lambda))$

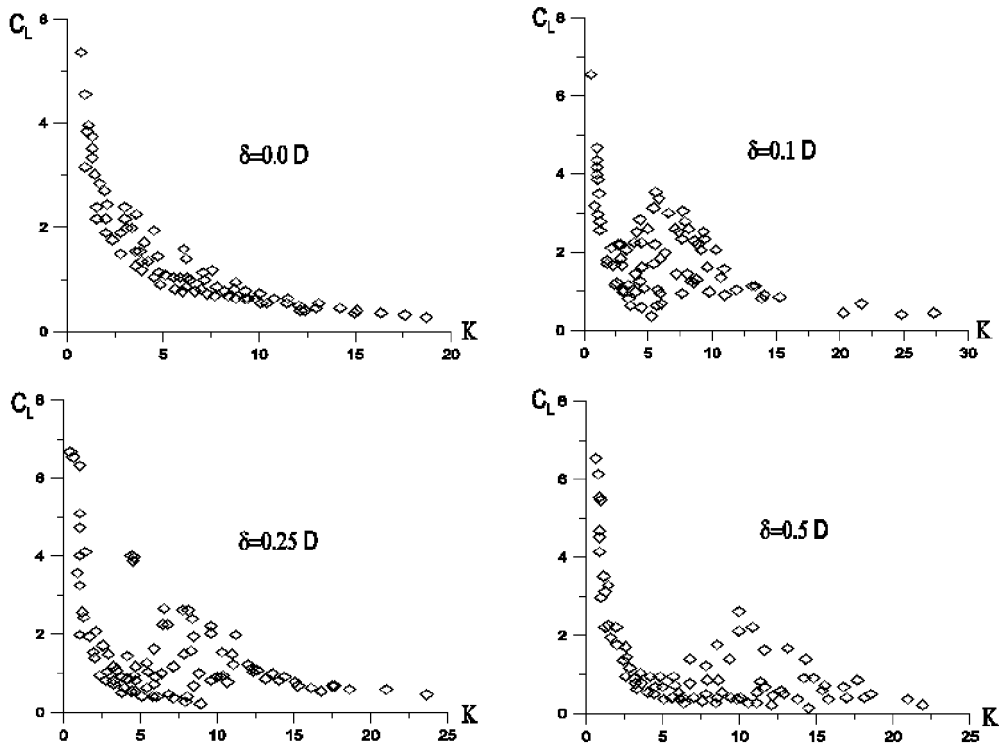


Рис. 7. Коэффициенты подъёмной силы на трубопровод  $C_L$  в зависимости от коэффициентов Келегана-Карпентера  $K$  и относительного зазора  $\delta/D$  по данным [1]

волнового течения на поверхности трубопровода от безразмерного зазора ( $\delta/D$ ) при указанных характерных фазовых углах показана на рис. 4. На этом рисунке зависимости  $v_{max}^* = f(\delta/D)$  представлены при различных значениях скорости ветра  $V_w$ , причем эти величины также представлены в безразмерной форме  $V_w^* = V_w(T/H)$ . Видно, что при безразмерном зазоре 0.17...0.22 могут формироваться безразмерные скорости до 0.35 (это соответствует 2.1...2.5 м/с), в то время как максимальная скорость волнового течения на поверхности трубопровода при отсутствии зазора или при относительном зазоре больше 0.5 составляет 1.2 м/с.

Вследствие интенсификации волнового течения в зоне зазора между трубопроводом и поверхностью дна могут возникать значительные вертикальные сдвиги скорости. Они являются причиной интенсификации турбулентных напряжений, под действием которых может происходить взмучивание донного материала и соответственно, интенсивный размыв грунта под трубопроводом.

На рис. 5 и 6 представлены результаты расчёта поля давления в виде изолиний безразмерного давления  $P^* = P/(\rho gy)$  при различном положении

трубы на дне.

Результаты моделирования, представленные на рис. 5 и 6, показали, что наблюдаются определенные деформации естественного волнового поля давления, обусловленные подводным трубопроводом.

### 3. ВЫВОДЫ

Созданная численная модель обтекания подводного трубопровода придонным волновым течением позволяет вычислить поле потенциальных скоростей и давления при произвольном зазоре между трубой и поверхностью дна. Результаты моделирования представлены в виде безразмерных характеристик, что обеспечивает несложный переход к размерным физическим величинам для конкретных параметров трубопровода, глубины, зазора между трубой и поверхностью дна, скорости ветра.

Потенциальное приближение волнового обтекания различных объектов широко используется в гидродинамике для анализа основных характеристик поля скоростей и давления. В рассматриваемом случае волнового обтекания подводного



трубопровода имеются данные экспериментальных исследований о том, что при относительно небольших числах Келегана-Карпентера ( $K < 5$ ) в окрестности трубы поле течения близко к потенциальному [1].

К числу наиболее интересных особенностей потенциального волнового обтекания трубопровода относится интенсификация скорости на поверхности трубы при относительном зазоре 0.1...0.3 при определенных фазах волны. При скорости ветра, равной 40 м/с, глубине 6 м и диаметре трубопровода 0.9 максимальная скорость течения на поверхности трубопровода равна примерно 1.2 м/с при отсутствии зазора и при относительном зазоре более 0.5. Числа Келегана-Карпентера равны при этом 6...6.4. При изменении относительного зазора в диапазоне 0.1...0.3 величина скорости течения на поверхности трубы увеличивается до 2.1...2.4 м/с, что соответствует увеличению чисел Келегана-Карпентера до 10...12. Экспериментальные исследования [1] показали, что при относительном зазоре 0.1...0.5 и при числах Келегана-Карпентера от 7 до 11 появлялись локальные экстремумы на зависимостях  $C_{xw} = f(K)$ ,  $C_{zw} = f(K)$ , причем однозначное объяснение этой особенности отсутствовало. На рис. 7 приведены зависимости коэффициента максимальной подъемной силы, действующей на трубопровод, полученные в [1], в зависимости от чисел Келегана-Карпентера и относительного зазора, которые хорошо иллюстрируют указанную особенность обтекания трубопровода. Близость безразмерных параметров ( $\delta/D, K$ ) для условий интенсификации скорости течения по данным моделирования и формирования экстремумов зависимостей  $C_{xw} = f(K)$  и  $C_{zw} = f(K)$  по результатам физических экспериментов служит основанием для вывода о взаимосвязи этих особенностей волнового обтекания подводного трубопровода при наличии зазора между трубой и дном.

Другой интересной особенностью потенциального волнового обтекания трубопровода является хорошо выраженная деформация естественного поля давления (рис. 5 и 6). Последняя величина относительно невелика и не превышает 10%, что, вероятно, объясняется приближением потенциального волнового обтекания.

При характерных величинах амплитуды скорости волнового обтекания порядка 1 м/с, диаметре трубопровода 1 м, числа Рейнольдса могут достигать  $10^5...10^6$ . Это означает, что в определенные фазы волны обтекание становится турбулентным и сопровождается вихреобразованием. Моделирование эффектов такого обтекания является пред-

метом дальнейших исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта CRDF, проект UP2-2424-SE-02.

#### 4. ЛИТЕРАТУРА

1. Cheong Hin-Fatt, Shenkoz J.N., Subbiah K. Wave forces on submarine pipelines near a plane boundary // Ocean Eng.- 1987.- Vol. 14, N 3.- P. 181-200.
2. Г. В. Грудникий, К. В. Мурадов, Е. Ф. Уланов Заглубление морских подводных трубопроводов.- Волгоград: Изд-во "ОАО Волгоград НИПИморнефть", 2000.- 85 с.
3. Li F., Cheng L. Numerical simulation of Local Scour Under Pipelines // Proc. of 8th Int. Conf. Offshore and Polar Eng., Montreal, ISOPE.- 1998.- Vol. II.- P. 76-81.
4. Li F., Cheng L. A Numerical Model for Local Scour Under Offshore Pipelines // J. Hydr. Eng., ASCE.- 1999.- Vol. 125(4).- P. 400-406.
5. Li F., Cheng L. Numerical Simulation of Pipeline Local Scour with Lee-Wake Effects // Intern. J. Offshore and Polar Engineering.- 2000.- Vol. 10, N 3.- P. 195-199.
6. Dobrotvorskyy A.N., Kushnir V.M. Calculation of the characteristics of dangerous lithodynamical effects for sea main pipelines // Proc. of 4th Int. Conf. "Development of Russian Arctic offshore", St. Petersburg.- 1999.- Vol. 1.- P. 436-439.
7. Sumer B.M. and Fredsøe J. Review of Wave/Current-Induced Scour Around Pipelines // Proc. of 23rd Int. Conf. Coastal Eng.- 1992.- Vol. 1.- P. 400-406.
8. Sumer B.M., Jansen H.R., Mao Y. and Fredsøe J. Effect of Lee-Wave on Scour Below pipelines in Current // J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE.- 1988.- Vol. 114(1).- P. 81-92.
9. Kushnir V.M., Lebedeva T.P., Perepada E.B. Vertical structure of the marine bottom boundary layer and turbulent fluxes parameterization // Proc. of 7th Int. Symposium of Flow Modeling and Turbulence Measurements. - Taiwan.- 1998.- Vol. 1.- P. 19-25.
10. Lambracos K.F., Chao J.C., Beckmann H., Brannon H.R. Wake model of hydrodynamic forces on pipelines // Ocean Eng.- 1987.- Vol. 14, N 2.- P. 117-136.
11. Li Y.C., Chen B., Lai G.Z. Numerical simulation of wave forces on seabed pipelines // China Ocean Eng.- 1998.- Vol. 12, N 2.- P. 203-211.
12. Burrows R., Tickell R.C., Hames D., and Najafian G. Morison wave force coefficients for application to random seas // Applied Ocean Res.- 1997.- Vol. 19, N 3-4.- P. 183-199.
13. Wolfram J. On alternative approaches to linearization and Morison's equation for wave forces // Proc. of the Royal Soc. Of London Ser. A. Mathem. & Phys. A.- 1999.- Vol. 455, N 1988.- P. 2957-2974.
14. Лаппо Д. Д., Стрекалов С. С., Завялов В. Н. Нагрузки и влияние ветровых волн на гидрометеорологические сооружения.- Л.: НИИ Гидротехники им. Б.Е. Веденеева, 1990.- 432 с.
15. Искендеров И. А. Проблемы проектирования и строительства морских трубопроводов.- Баку: Госиздат, 1970.- 121 с.

16. *Chao J.L. and Hennessy P.V.* Local Scour Under Ocean Outfall Pipelines // *J. Water Pollution Control Federation.*– 1972.– Vol. 44(7).– P. 1443-1447.
17. *Bearman P.W., Wadcock A.J.* The interaction a pair of circular cylinders normal to a stream // *J. Fluid Mech.*– 1973.– Vol. 61.– P. 495-511.
18. *Bearman P.W., Zdravcovich M.M.* Flow around a circular cylinder near a plane boundary // *J. Fluid Mech.*– 1978.– Vol. 89.– P. 33-47.
19. *Bijfer E.W. and Leeuwestein W.* Interaction Between Pipelines and the Seabed Under the Influence of the Waves and Currents // *Seabed Mech., Proc. Symp. IUTAM/IUGG. Int. Union of Theo. App. Mech./Int. Union of Geol. and Geophysics. R.*– 1986.– Vol. 1.– P. 235-242.
20. *Chiew Y.M.* Prediction of Maximum Scour Depth at Submarine Pipelines // *J. Hydr. Eng., ASCE.*– 1991.– Vol. 117(4).– P. 452-466.
21. *Hansen E.A., Fredsoe J. and Ye M.* Two-Dimensional Scour Below Pipelines // *Proc. of 5th Int. Symp. Offshore Mech. and Artic Eng., Tokio.*– 1986.– Vol. 1.– P. 670-678.
22. *Hansen E.A.* Scour Below Pipelines and Cable: A Simple Model // *Proc. of Offshore Mech. and Arctic Eng. Conf.*– 1992.– Vol. V-A, Pipeline Tech.– P. 130-138.
23. *Ibrahim A. and Nalluri C.* Scour Prediction Around Marine Pipelines // *Proc. of 5th Int. Symp. Offshore Mech. and Artic Eng., Tokio.*– 1986.– Vol. 1.– P. 679-684.
24. *Kjeldsen S.P., Gjørsvik O., Bringaker K.G. and Jacobsen J.* Local Scour Near Offshore Pipelines // *Proc. of 2nd Int. Conf. Port and Ocean Eng. Under Artic Conditions, Univ. of Iceland.*– 1973.– Vol. 1).– P. 308-331.
25. *Van Beek F.A. and Wind H.G.* Numerical Modeling of Erosion and Sedimentation Around Pipelines // *Coastal Eng.*– 1990.– Vol. 14.– P. 107-128.
26. *Ochiai M., Eudo S., Wada A.* Flow Characteristics near the submerged breakwater in the wave induced current // *Proc. of 7th Int. Symposium of Flow Modeling and Turbulence Measurements. Taiwan.*– 1998.– Vol. 1).– P. 529-536.
27. *Hwang R.R., Sue Y.C.* Numerical simulation of non-linear interaction of water waves with submerged obstacles // *Proc. of 7th Int. Symposium of Flow Modeling and Turbulence Measurements. Taiwan.*– 1998.– Vol. 1).– P. 545-558.
28. *Huang C-C, Tseng Y-T.* Flow Patterns for Waves with an Uniform Current Passing through a Submerged Breakwater // *Proc. of 7th Int. Symposium of Flow Modeling and Turbulence Measurements. Taiwan.*– 1998.– Vol. 1.– P. 537-544.
29. *Massel S.R.* Harmonic generation by waves propagating over a submerged step // *Coastal Eng.*– 1983.– Vol. 7.– P. 357-380.
30. *Mei C.C., Black J.L.* Scattering of surface waves by rectangular obstacles in water of finite depth // *J. Fluid Mech.*– 1969.– Vol. 38.– P. 499-511.
31. *Newman J.N.* Propagation of water waves past long two-dimensional obstacles // *J. Fluid Mech.*– 1965.– Vol. 23.– P. 23-29.
32. *Rey V., Belzons M., Guazzelli E.* Propagation of surface gravity waves over a rectangular submerged bar // *J. Fluid Mech.*– 1992.– Vol. 235.– P. 453-479.
33. *Skotner C, Jonsson I.G., Shourup J.* Wave forces on a large horizontal submerged cylinder // *Ocean Eng.*– 1994.– Vol. 21, N 8.– P. 711-731.
34. Руководство по расчёту параметров ветровых волн. – Л.: Гидрометеиздат, 1969 - 138 с.
35. Кудрявая К.И., Серяков Е.И., Скриптунова Л.И. Морские гидрометеорологические прогнозы. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 310 с.