

УДК 622.242

ДИФФУЗИЯ ВЕЩЕСТВА С НЕЙТРАЛЬНОЙ ПЛАВУЧЕСТЬЮ ИЗ ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫХ И ВОЛНОВЫХ ТЕЧЕНИЙ

В. М. КУШНИР, С. В. ФЕДОРОВ

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь**Получено 26.08.2004 ◊ Пересмотрено 12.10.2004*

Рассматривается задача моделирования диффузии вещества с нейтральной плавучестью при его утечках из подводных трубопроводов в условиях воздействия волновых и квазистационарных течений. Численное решение двумерного уравнения диффузии выполнено с использованием пространственного распределения коэффициентов вертикальной диффузии, которые вычислены на основе параметризации турбулентных потоков вблизи трубопровода. Коэффициенты горизонтальной диффузии в расчетной области определены на основе закона "4/3" и приняты постоянными. Исследовано влияние величин коэффициентов вертикальной диффузии на динамику и структуру пятна примеси.

Розглядається задача моделювання дифузії речовини з нейтральною плавучістю при її витіках з підводних трубопроводів в умовах впливу хвильових і квазістаціонарних течій. Чисельне рішення двомірного рівняння дифузії виконано з використанням просторового розподілу коефіцієнтів вертикальної дифузії, що обчислювались на основі параметризації турбулентних потоків поблизу трубопроводу. Коефіцієнти горизонтальної дифузії у розрахунковій області визначені на основі закону "4/3" і прийняті постійними. Досліджено вплив величин коефіцієнтів вертикальної дифузії на динаміку та структуру плями домішки.

The diffusion modeling of a substance with neutral buoyancy is considered in the case of its outflow from underwater pipelines in conditions of the influence of the wave and quasi-stationary currents. The numerical decision of the 2-D diffusion equation is carried out with use of a spatial distribution of the vertical diffusion coefficient, which are calculated on the basis of the parameterization of the turbulent fluxes near the pipeline. The horizontal diffusion coefficients are determined on the basis of the "4/3" law and are accepted constant ones in settlement area. The influence of the values of the vertical diffusion coefficients on dynamics and structure of the impurity spot is investigated.

ВВЕДЕНИЕ

Подводные трубопроводы широко используются в настоящее время как наиболее эффективные средства транспортировки жидких и газообразных веществ на значительные расстояния, как составная часть средств освоения океанского шельфа, как элементы морских терминалов и других гидротехнических сооружений. Обычно такие системы имеют высокую надежность и рассчитаны на период эксплуатации до 50...100 лет. Тем не менее, известны аварии подводных трубопроводов, связанные с этим утечки продуктов транспортировки в морскую среду и их распространение под воздействием диффузионных процессов. Характеристики таких диффузионных процессов определяются многими факторами, среди которых главными можно назвать структуру поля скорости вблизи трубопровода, расход вещества, вытекающего в морскую среду и коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии. Моделирование диффузионных процессов при утечках из подводного трубопровода имеет большое значение для оценки их возможного негативного влия-

ния на окружающую среду, прогноза распространения продукта транспортировки и изменения его концентрации во времени.

Проблема диффузии примеси в морской среде рассмотрена в большом числе экспериментальных и теоретических работ. Широко известны эксперименты с родаминовыми красителями, выполненные Р. В. Озмидовым и его сотрудниками [1, 2]. Эти эксперименты проведены для условий открытого моря и в них не учитываются локальные особенности поля скорости, которые формируются при обтекании различных препятствий.

Теоретические исследования этой проблемы основаны на аналитических [3, 4] или численных методах решения уравнения диффузии (иногда его называют транспортным уравнением) [5-12]. В указанных работах рассмотрены локальные особенности поля скорости квазистационарных течений, обусловленные обтеканием береговой линии и/или рельефа дна. В качестве допущений принимаются либо постоянные величины коэффициентов горизонтальной диффузии [5-9], либо влиянием горизонтальной диффузии вообще пренебрегают [13].

В отличие от перечисленных работ задачей настоящего исследования является моделирование диффузионного процесса в окрестности подводного трубопровода, который обтекается квазистационарным или волновым течением, а также суммарным квазистационарным и волновым потоками. При этом учитывается вихреобразование при обтекании трубы, пространственная неоднородность коэффициента вертикальной диффузии и скорость поступления вещества из трубопровода в морскую среду. Задача решается при следующих условиях и допущениях: 1. Плавучесть вещества, вытекающего из трубопровода, принята нейтральной, а его источник находится в верхней точке трубы. 2. Коэффициент горизонтальной диффузии принят постоянным в соответствии с известным "законом 4/3" [14, 15]. 3. Структура поля скорости течения описывается уравнениями вязкого обтекания трубопровода, расположенного вблизи поверхности дна [16].

Работа выполнена в рамках проекта НАН Украины "Ресурсы шельфа" целевой научной программы "Научные основы наращивания минерально-сырьевой базы Украины" (Номер Гос. регистрации 0102U001482), а также международного проекта по программе CRDF.

1. МОДЕЛЬ

Пространственно-временное распределение концентрации примеси $c(x, y, t)$ для двухмерной задачи находится в результате численного решения уравнения диффузии:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial(cu)}{\partial x} + \frac{\partial(cv)}{\partial y} = K_c \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_c \frac{\partial c}{\partial y} \right), \quad (1)$$

где $u(x, y, t), v(x, y, t)$ – компоненты горизонтальной и вертикальной скорости течения; K_c, k_c – коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии соответственно.

Коэффициент горизонтальной диффузии принимается постоянными во всей расчетной области, а его величина оценивается по известному соотношению "4/3", т. е. $K_c = kL^{4/3}$, где $k = 0.005 \dots 0.01$ – коэффициент; L – характерный размер вихрей, формирующихся при обтекании трубопровода [2]. При диаметре трубопровода 0.9...1 м характерные размеры вихрей равны 1 м [16] и, в соответствии с этим, $K_c = 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$. Коэффициенты вертикальной диффузии вычислялись по известному полю скоростей, рассчитанному по гидродинамической модели вязкого обтекания трубопровода придонными волновыми течениями [16]. Использовано

известное соотношение для параметризации турбулентных потоков на основе общей гипотезы Буссинеска:

$$-\overline{u'v'} = k_c \frac{d\overline{U}}{dn} = k_c \text{Re} \left(\frac{d\overline{u}}{dy} + i \frac{d\overline{v}}{dx} \right), \quad (2)$$

где $\overline{u'v'}$ – квадрат динамической скорости, осредненной за интервал времени, значительно превышающий период волнового течения; $d\overline{u}/dy, d\overline{v}/dx$ – осредненные за этот же интервал времени значения составляющих скорости деформации; n – направление нормали к вектору скорости \overline{U} .

В дискретном виде соотношение (2) записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} -\overline{u'v'} &= k_c \frac{\Delta \overline{U}}{\Delta n} = k_c \text{Re} \left(\frac{\Delta \overline{u}}{\Delta y} + i \frac{\Delta \overline{v}}{\Delta x} \right) = \\ &= k_c \frac{\sqrt{(\Delta \overline{u})^2 + (\Delta \overline{v})^2}}{\Delta y \cos(\alpha)} = k_c \frac{\Delta \overline{u}}{\Delta y}, \end{aligned} \quad (3)$$

где α – угол между направлением вектора скорости \overline{U} и горизонтальной осью ox .

Значения коэффициентов вертикальной диффузии вычислены по соотношению (3) при осреднении за 10 периодов волн. Величины $k_c(x, y)$ имеют сложную пространственную структуру и для наглядности их пространственное распределение показано на рис. 1 в виде областей с различным диапазоном оценок. Основная особенность этого распределения состоит в том, что максимальные величины $k_c(x, y)$ концентрируются слева и справа от верхней части трубы, в области максимального вихреобразования.

Уравнение (1) решается в конечно-разностной форме при следующих начальных и граничных условиях.

Источником примеси является поврежденный участок трубы площадью S , из которого в окружающую среду в единицу времени поступает некоторое количество примеси, зависящее от скорости вытекания продукта транспортировки (рабочего внутреннего давления трубопровода). В соответствии с сохранением количества объема поступающей и выходящей из расчетной области примеси в любой момент времени должно выполняться следующее условие:

$$SVc_0 \cdot \Delta t = \Delta x \Delta y \Delta z \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{i,j}, \quad (4)$$

где S – площадь поврежденного участка трубопровода; V – скорость вытекания продукта транспор-

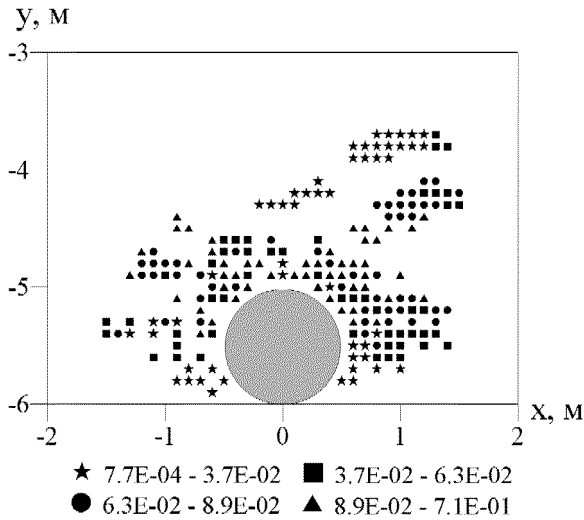


Рис. 1. Расчетные коэффициенты вертикальной диффузии k_c , m^2/c вблизи трубопровода при обтекании его придонными течениями

тировки из трубопровода; c_0 – начальная концентрация; Δt – интервал времени; $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – размер сетки расчетной области; $c_{i,j}$ – расчетная концентрация в узле сетки с координатами i, j .

Таким образом, полагая, что выброс происходит в точку с координатами i_0, j_0 и скорость поступления примеси в окружающую среду постоянна, временное изменение концентрации в этой точке определяется из условия:

$$c(i_0, j_0) = SV c_0 \cdot \delta t / (\Delta x \Delta y \Delta z), \quad (5)$$

где δt – шаг по времени.

На боковых границах должно выполняться условие равенства горизонтального потока примеси его переносу:

$$K_c \frac{\partial c}{\partial x} + u(c - c_0) = 0, \quad (6)$$

где c_0 – концентрация примеси за пределами расчетной области.

Граничные условия отсутствия потока примеси должны выполняться на свободной поверхности, на стенках трубы (за исключением отверстия) и на дне:

$$\frac{\partial c}{\partial n} = 0, \quad (7)$$

где n – направление нормали к поверхности.

В конечно-разностном виде уравнение (1) имеет

следующий вид:

$$\begin{aligned} c_{i,j}^{t+1} \left[1 + \frac{2\delta t}{h^2} (K_{i,j} + k_{i,j}) \right] = & c_{i,j}^{t-1} \left[1 + \frac{2\delta t}{h^2} \times \right. \\ & \times (K_{i,j} + k_{i,j}) \left. \right] + \frac{2\delta t}{h} [(cu)_{i-1/2,j} - (cu)_{i+1/2,j} + \\ & + (cv)_{i,j-1/2} - (cv)_{i,j+1/2}] + \frac{2\delta t}{h^2} [K_{i,j} (c_{i+1/2,j} + \\ & + c_{i-1/2,j}) + k_{i,j} (c_{i,j+1/2} + c_{i,j-1/2}) + (c_{i,j+1/2} - \\ & - c_{i,j-1/2})(K_{i,j+1/2} - k_{i,j-1/2})], \end{aligned} \quad (8)$$

где $h = \Delta x = \Delta y$ – шаг сетки; t – индекс времени. Величины, указанные в (8) без индекса времени, берутся для текущего момента времени t .

При решении аппроксимационного уравнения (8) должно выполняться условие положительной определенности концентрации примеси во всей расчетной области.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчет диффузии примеси с нейтральной плавучестью из поврежденного подводного трубопровода выполнен при следующих условиях. Диаметр трубопровода равен 1 м, глубина моря – 6 м, скорость ветра – 20 м/с, площадь отверстия в трубопроводе – 0.01 m^2 , скорость поступления примеси – 1.2 м/с, масса примеси, поступающая в морскую среду за 1 с – 12 кг. Характеристики поверхностных волн определены по соотношениям, которые используются в гидрометеорологии для инженерных расчетов [18]. Для рассматриваемого случая средняя высота волны равна 0.9 м, период – 3.9 с, длина волны – 22 м.

Скорость поверхностного ветрового течения вычислена на основе эмпирического соотношения для мелкого моря [19] и равна 0.14 м/с. Профиль квазистационарного течения определен с учетом придонного пограничного слоя толщиной 2.1 м, вычисленного по модели Прандтля [20, 21]. Распределение скорости течения вокруг подводного трубопровода получено в результате численного решения задач волнового и квазистационарного обтекания трубы вязкой жидкостью [16].

На рис. 2–4 показаны пространственно-временные распределения концентрации примеси для трех различных потоков, обтекающих подводный трубопровод. На этих рисунках хорошо видны стадии эволюции пятна примеси через каждые 5 с, начиная от момента ее поступления в морскую среду. Последние фрагменты эволюции пятен вычислены через 40 с после начала утечки.

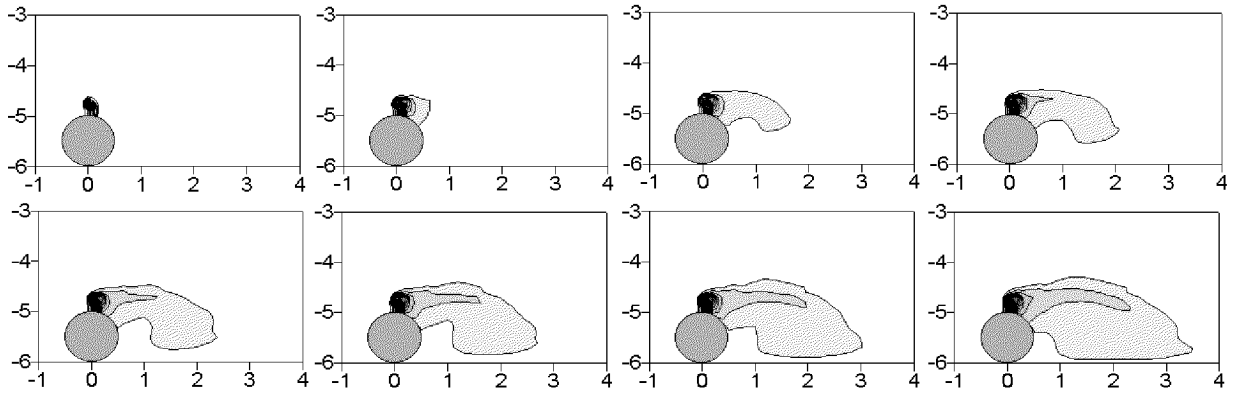


Рис. 2. Распространение примеси при обтекании трубопровода стационарным течением

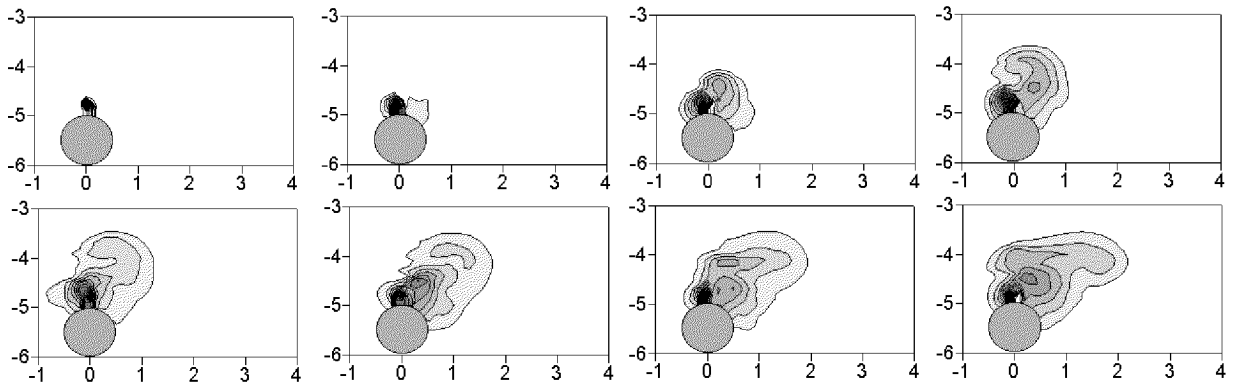


Рис. 3. Распространение примеси при обтекании трубопровода волновым течением

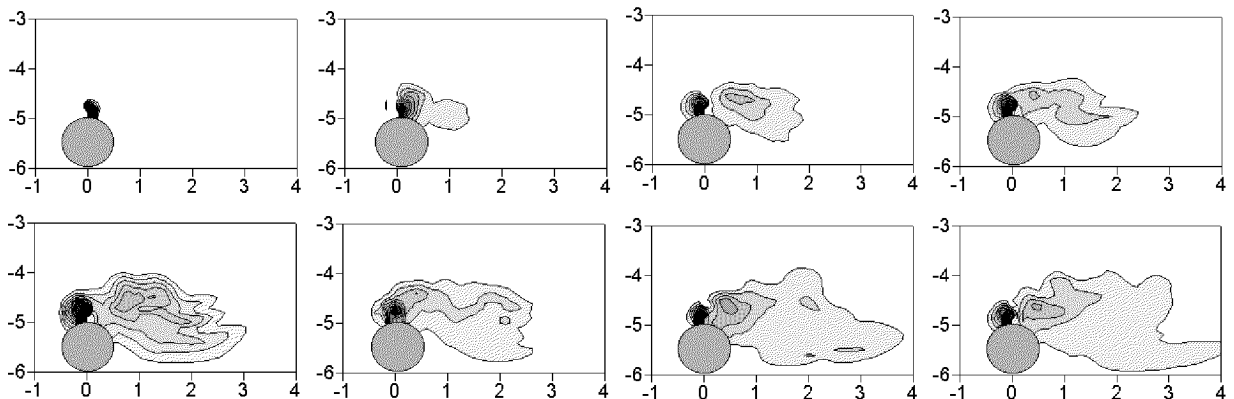


Рис. 4. Распространение примеси при обтекании трубопровода суммарным течением

Максимальные значения вблизи отверстия на поверхности трубы равны $0.12 \dots 0.13 \text{ кг/м}^3$, изолинии на рис. 2–4 проведены через 0.01 кг/м^3 , эта же величина соответствует крайней изолинии, положение которой обозначает условную границу пятна примеси.

При обтекании подводного трубопровода ква-

зистационарным течением пятно примеси растет в направлении этого потока. При этом пятно расширяется также в вертикальном направлении, главным образом в сторону дна. Волновому обтеканию соответствует более сложная картина вследствие реверсивного характера скорости течения и более интенсивного вихреобразования. От-

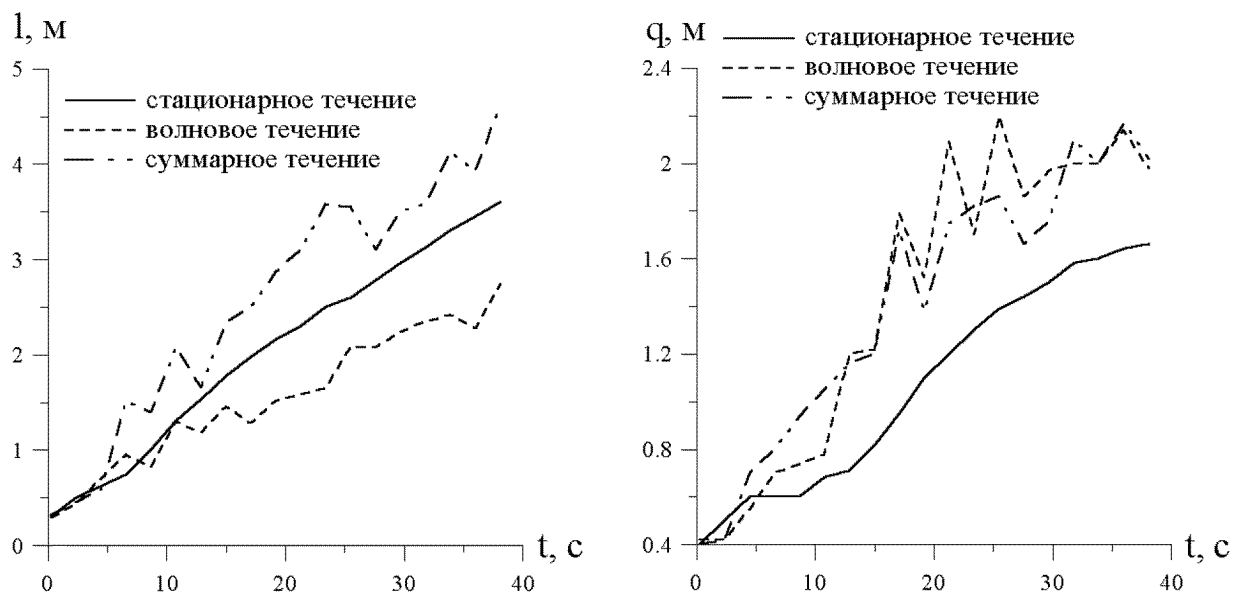


Рис. 5. Зависимости максимальной протяженности пятна примеси в горизонтальном $l(t)$ и вертикальном $q(t)$ направлениях от времени диффузии

существо симметрии в пространственной структуре концентрации примеси заметно проявляется уже на первых представленных стадиях трансформации примеси, а, начиная с 20-й секунды расчетного времени, пятно примеси заметно вытягивается в направлении распространения волн. Комбинированное течение – сумма квазистационарного и волнового потоков – формирует пятно примеси, в структуре которого проявляются особенности, характерные для рассмотренных типов обтекания.

На рис. 5 приведены зависимости, характеризующие скорость распространения примеси в горизонтальном и вертикальном направлениях. Эти зависимости вычислены для воздействия квазистационарного, волнового и суммарного течений. Наибольшая скорость распространения примеси в горизонтальном и вертикальном направлениях характерна для суммарного течения, наименьшая скорость в горизонтальном направлении – для волнового течения, в вертикальном направлении – для квазистационарного течения.

Характерные величины пятна примеси при рассмотренных условиях составляют примерно 4.5 м в горизонтальном направлении и 2.1 м в вертикальном направлении за 40 с (около 10 периодов волн) для суммарного течения; 3.5 м по горизонтали и 1.6 м по вертикали для квазистационарного течения и 2.5 м по горизонтали и примерно 2.3 м по вертикали для волнового течения.

ВЫВОДЫ

1. Разработана численная схема решения уравнения диффузии примеси, которая позволяет моделировать распространение продукта транспортировки в морской среде при его утечках из подводного трубопровода. При этом рассмотрен наиболее простой случай нейтральной плавучести продукта транспортировки, который можно применить для условий транспорта тяжелых сортов нефти, плотность которых близка к плотности воды.

2. При решении уравнения диффузии использована параметризация вихревых потоков $\overline{u'v'}$ в виде пространственных распределений оценок коэффициента вертикальной диффузии $k_e = -\overline{u'v'}/(\Delta\overline{u}/\Delta y)$, вычисленных на основе использования вихреобразующей модели вязкого обтекания подводного трубопровода [16]. С целью определения влияния такой параметризации на результаты моделирования были вычислены пространственно-временные распределения диффузии примеси при постоянных величинах коэффициента вертикальной диффузии, и затем эти распределения сопоставлены с полученными данными. Результаты сопоставления приведены на рис. 6, а - г. Видно, что введенная параметризация локализует распространение примеси в зонах наиболее активного вихреобразования, в верхней части трубопровода. При постоянных величинах вертикальной диффузии такая локализация отсут-

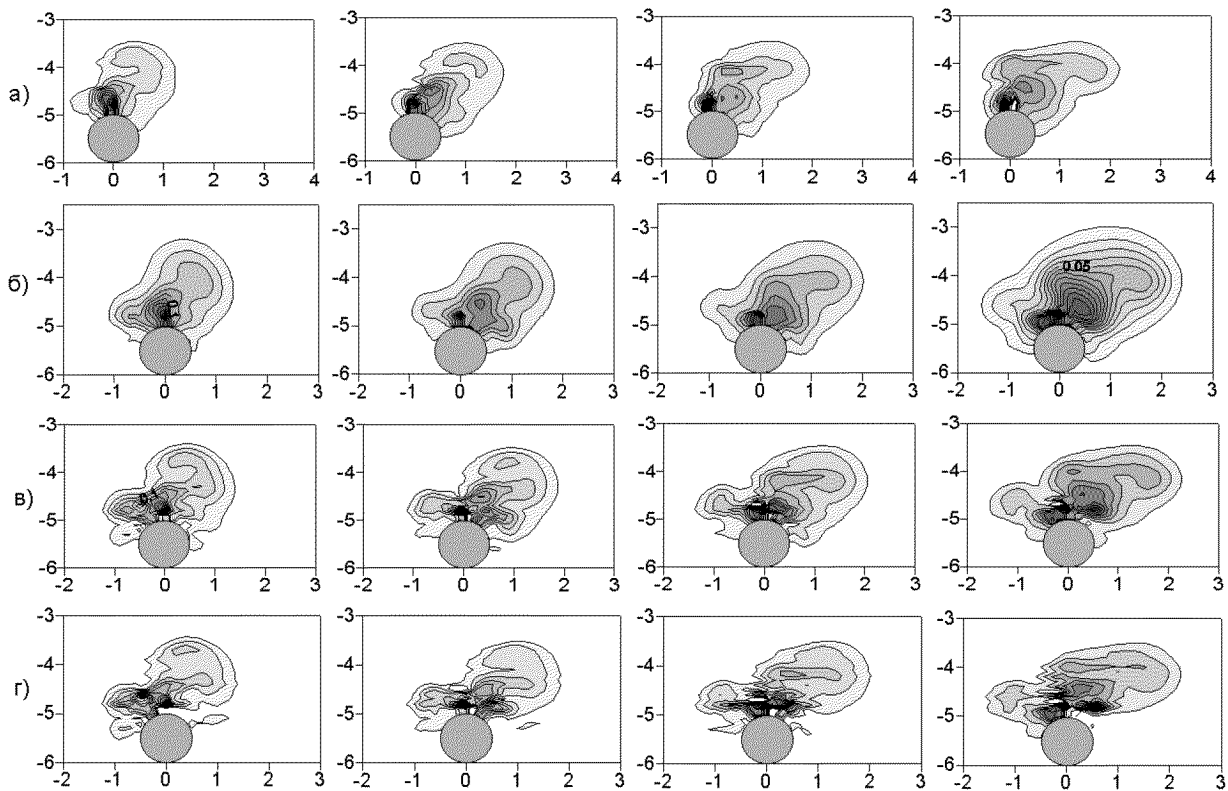


Рис. 6. Распространение примеси при обтекании трубопровода волновым течением и при: а – переменном коэффициенте вертикальной диффузии $k_c(x, y)$; б – постоянном коэффициенте вертикальной диффузии $k_c = 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}^2$; в – постоянном коэффициенте $k_c = 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}^2$; г – постоянном коэффициенте $k_c = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}^2$

ствуется. Так как реальная диффузия примеси обусловлена в значительной степени вихревыми движениями, введенная параметризация может обеспечить более реалистичное распределение диффузии примеси, чем это происходит при использовании постоянных коэффициентов вертикальной диффузии. Естественно, это утверждение нуждается в экспериментальной проверке.

3. Представленный в настоящей работе подход и созданные программные средства обеспечивают широкие возможности для решения многих задач, связанных с оценкой последствий утечек продуктов транспортировки из подводных трубопроводов в морскую среду.

1. Озмидов Р. В. Турбулентность и турбулентное перемешивание в океане // Океанология.– 1967.– Т. 7, №56.– С. 860-867.
2. Монин А. С., Озмидов Р. В. Турбулентность в океане. В кн. "Физика океана. Гидрофизика океана".– М.: Наука, 1978.– С. 148-207.
3. Озмидов Р. В. К вопросу о минимизации негативных воздействий сбросов в прибрежную зону моря // Океанология.– 1996.– Т. 36, №1.– С. 20-25.
4. Deyneko Y. V-Model of Diffusion // Proc. of the 7-th Int. Symp. on Flow Modeling and Turbulence

Measurements.– Tainan, Taiwan, October 5-8, 1998.– P. 237-242.

5. Пяковский Р. В., Молчанов В. И. Моделирование динамического переноса загрязняющих веществ в Невской губе // Метеорология и гидрология.– 1976.– №3.– С. 68-77.
6. Руховец Л. А. Математическое моделирование водообмена и распространения примеси в Невской губе // Метеорология и гидрология.– 1982.– №7.– С. 78-87.
7. Астраханцев Г. П., Руховец Л. А., Егорова Н.Б. Математическое моделирование распространения примеси в водоемах // Метеорология и гидрология.– 1988.– №6.– С. 71-79.
8. Михайлова Э. Н., Шапиро Н. Б., Юшенко С. А. Моделирование распространения пассивной примеси в Севастопольских бухтах // Морской гидрофизический журнал.– 1999.– №3.– С. 29-42.
9. Иванов В. А., Рябцев Ю.Н. Моделирование поверхностных течений и переноса нефти в районе бухт Камышовая и Казачья // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь, МГИ НАН Украины, 2001.– С. 18-30.
10. Oh Im Sang, Zhurbas Victor, Park Won Sun Estimating horizontal diffusivity in the East Sea (Sea of Japan) and the northwest Pacific from satellite-tracked drifter data // Geophys. Res.– 2000.– vol.105, №3.– P. 6483-6492.
11. Han G.D., Hansen D.V., Casatillo A. Diagnostic model of water and oxygen transport in the New York

- Bight // Anoxia in the New York Bight.– New York, 1980.– P. 14-23.
12. Fennel W. Turbulent diffusion in wind-driven currents // Deep-Sea Res.– 1981.– vol.28, N7.– P. 695-704.
 13. Еремеев В.Н., Кубряков А. И., Шишов А. А. Расчет распространения технических загрязнений у Южного берега Крыма в результате аварии в Ласпинской бухте // Глобальная система наблюдений Черного моря: фундаментальные и прикладные аспекты.– Севастополь, МГИ НАН Украины, 2000.– С. 45-55.
 14. Озмидов Р. В. О зависимости коэффициента горизонтального турбулентного обмена в океане от масштаба явления // Изв. АН СССР, сер. физ. атм. и океана.– 1968.– т.4, N11.– С. 1224-1225.
 15. Петчев В. Определение коэффициентов турбулентной диффузии в волновом потоке // Тр. института океанологии, 2.– М., 1998.– С. 12-19.
 16. Кушнир В. М., Федоров С. В. Нестационарное вязкое течение вокруг трубопровода, расположенного вблизи поверхности дна // Прикладная гидромеханика.– 2004.– 6(78), N1.– С. 9-18.
 17. Lesieur M., Metais O. New Trends in Large-Eddy Simulation of Turbulence // Annu. Rev. Fluid Mech.– 1996.– 28.– P. 45-82.
 18. Кудрявая К.И., Серяков Е.И., Скриптунова Л.И. Морские гидрометеорологические прогнозы.– Л.: Гидрометеоиздат, 1974.– 310 с.
 19. Добротворский А. Н., Дружевский С. А., Кушнир В. М., Петренко Л. А. Математическое моделирование деформаций дна под воздействием гидрометеорологических факторов // 4-ая Рос. науч.-техн. конф. "Современное состояние, проблемы навигации и океанографии".– Сб. докл., Санкт-Петербург, т.2, 6-9 июня 2001.– С. 293-298.
 20. Прандтль Л. Гидроаэромеханика.– М.: Инстр. лит-ра, 1949.– С. 400-410.
 21. Шлигтинг Г. Теория пограничного слоя.– М.: Наука, 1969.– 742 с.