УДК 004.896

В.Г. ПИСАРЕНКО, Ю.В. ПИСАРЕНКО

ИНТЕРПОЛЯЦИОННАЯ ПРОЦЕДУРА ПРОГНОЗНОГО РАСЧЕТА ДВИЖЕНИЯ ПОЛЛЮТАНТОВ В АКВАТОРИИ

Описана интерполяционная процедура прогнозного расчета миграции поллютантов в акватории, обеспечивающая оценку мероприятий предупреждения техно-экологического происшествия или нейтрализации его последствий.

Введение. При решении данной задачи используется численная модель горизонтальных течений с учетом полей течений, связанных с воздействием ветра. Предлагается интерполяционная процедура математического моделирования путей миграции загрязнений.

Использование разрабатываемой информационной технологии (ИТ) (компоненты ИТ: информационное, математическое, алгоритмическое и программное обеспечение) предполагается в организациях, где требуется проводить такие мероприятия:

– мониторинг чрезвычайных ситуаций, связанных с прогнозом наводнения и оценкой ожидаемого экономического ущерба в области метеобедствия;

– мониторинг экологического состояния земной поверхности, например, экологическая инспекция, коммунальные службы (контроль за распространением сточных вод и т. п.), в нефтедобывающей промышленности (например, на морских буровых установках), на метеостанциях;

– при проектировании, строительстве, реконструкции и эксплуатации различных инженерных сооружений, а также в министерствах чрезвычайных ситуаций (например, наблюдение за таянием снега в горах для своевременного принятия мер по подготовке к наводнению).

Для имитации прогнозирующей динамики движения поллютантов в водной среде необходимо иметь карты течений с учетом их

сезонной изменчивости. Карты хранятся в цифровом виде в базе данных. Информация, содержащаяся в них, может быть представлена нерегулярной сетью точек, регулярной сетью точек или с помощью изолиний. Предполагается, что в конкретном случае, на примере которого будет рассмотрена предлагаемая в данной работе интерполяционная процедура прогнозного расчета, карта трехмерных сезонных течений представлена нерегулярной сетью точек (рис. 1). Упростим задачу и рассмотрим только двухмерное поле течений, не учитывая третью пространственную координату.

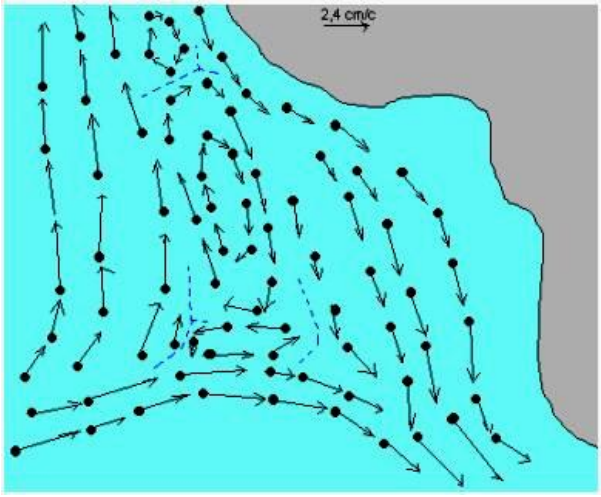


РИС. 1. Пример карты течений, представленной нерегулярной сетью точек (пунктиром указаны хребты на дне моря, которые сильно влияют на течение)

В качестве начальных условий берутся данные на момент выброса загрязнений в морскую среду. То есть, в систему необходимо ввести такие входные данные:

– район акватории, в котором произошел разлив загрязнений;

– время (например, в каком месяце, – в зависимости от требуемой точности; так как поле течений меняется в основном посезонно и циклически, то в большинстве случаев достаточно указать в каком месяце произошел выброс поллютанта, и тогда из базы данных будет извлечена карта поля течений, соответствующая данному сезону);

– начальные координаты центра пятна;

– начальные размеры и форма выброса;

– предполагаемый объем выброса поллютанта;

– плотность вещества, разлив которого произошел, – это необходимо для расчета скорости оседания частиц вещества;

– ветровые условия (направление и скорость ветра), имеющие значительное влияние на величины скоростей движения загрязняющего пятна в разных направлениях;

– точность, т. е. интервал времени, через который необходимо вычислить новое положение координат пятна.

В качестве выходных данных нужно получить имитационную демонстрацию средствами 3D-графики процесса распространения загрязнений в водной среде по результатам предварительно проведенного прогнозирующего расчета динамики движения пятна с возможностью сохранения отдельных кадров в файлы для последующей обработки.

Для прогнозирующего расчета координат движущегося поллютанта исходное пятно представляется массивом точек. Предлагаемый алгоритм прогнозного расчета движения загрязнений можно упростить и свести задачу к рассмотрению движения одной точки пятна, например, его центра. В дальнейшем этот же алгоритм следует применить ко всему массиву остальных точек пятна аналогичным образом.

Здесь (см. рис. 1) стрелочками (векторами) представлены направление и скорость течения в данной точке. Величина скорости течения в точке, из которой начинается вектор, – это длина вектора, определить длину каждого вектора можно путем сравнения с эталонным вектором, изображенным в верхней части рисунка. Вектор означает, что в фиксированной точке с известными координатами имеются данные о направлении и значении скорости течения акватории. Направление течения в каждой точке поля течений указано стрелкой. Это поле течений содержит данные о каждой изображенной точке и о соответствующем ей направлении и скорости течения. Для дальнейших расчетов длина вектора скорости в явном виде используется второстепенно. Практически во всех дальнейших вычислениях алгоритмов прогнозирующего расчета используются проекции на оси *OX* и *OY* вектора скорости $\overline{V}$, – V_x и V_y соответственно, связанных с длиной вектора скорости формулой: $|\overline{V}| = \sqrt{(V_x)^2 + (V_y)^2}$.

Математическая модель миграции объектов (в том числе поллютантов) в акватории использует карты поля течений, получаемые на основе решения конечно-разностным методом начально-краевой задачи уравнений Навье – Стокса [1].

Постановка задачи. Вычислить компоненты вектора скорости V_{x_0} и V_{y_0} в заданной точке с координатами $(x_0; y_0)$ с учетом поля течений на первом шаге, затем переместить точку в новое положение, в которое она перейдет через интервал Δt в направлении вычисленного вектора скорости с компонентами V_{x_0} и V_{y_0} и так далее.

Входные данные – это начальное положение точки пятна (например, предположим, что это центр пятна) – $(x_0; y_0)$; интервал времени расчета – Δt (например, каждый час) и карта поля течений указанного региона с учетом сезонной изменчивости, представленная неравномерной либо равномерной сетью точек.

Процедура прогнозного расчета движения поллютантов в акватории.

Шаг 1. Определение среди точек нерегулярной сети карты поля течений трех ближайших к заданной точке $(x_0; y_0)$. Для этого сначала вычисляются расстояния от точки $(x_0; y_0)$ до всех точек, содержащихся на карте поля течений, и выбираются три наименьших расстояния. Выбранные три точки (1, 2, 3), описываются четырьмя значениями: два из них – координаты точки, остальные – компоненты вектора скорости в этой точке. Эти точки можно представить в виде векторов: $\overline{r_1}(x_1, y_1, V_{x_1}, V_{y_1})$, $\overline{r_2}(x_2, y_2, V_{x_2}, V_{y_2})$, $\overline{r_3}(x_3, y_3, V_{x_3}, V_{y_3})$.

Шаг 2. Построение интерполяционной плоскости. Имея три вектора и начальную точку $(x_0; y_0)$, формируется интерполяционная плоскость на базе графической интерпретации рассматриваемого алгоритма (рис. 2).

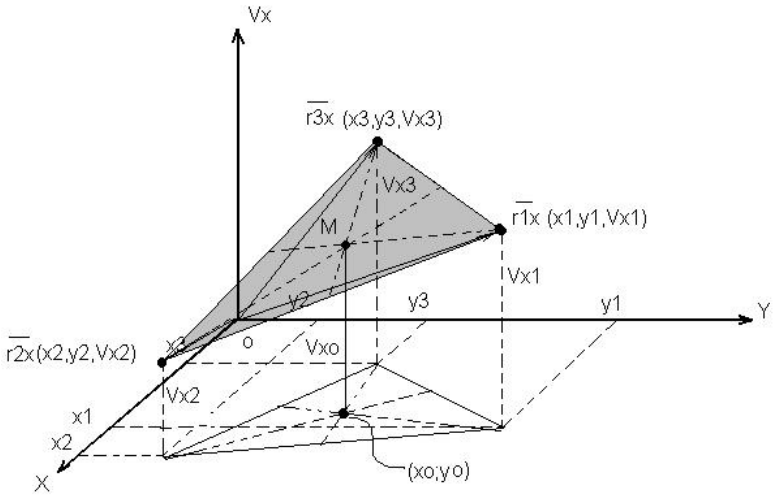


РИС. 2. Графическая интерпретация нахождения неизвестного компонента V_{x_0} вектора скорости для точки $(x_0; y_0)$

Аналогична (рис. 2) картина и для расчета значения компонента V_{y_0}, за исключением лишь того, что вместо оси OV_x, используется ось OV_y, и третьими координатами векторов $\overline{r_1}, \overline{r_2}, \overline{r_3}$ будут числа V_{y_1}, V_{y_2} и V_{y_3} соответственно, поэтому она в явном виде здесь не представлена.

Шаг 3. Выбор пространства для определения проекций V_{x_0} и V_{y_0}. Для нахождения проекции V_{x_0} в трехмерном пространстве, обозначенном осями OX, OY и OV_x, изображены вектора $\overline{r_{1x}}(x_1, y_1, V_{x_1})$, $\overline{r_{2x}}(x_2, y_2, V_{x_2})$, $\overline{r_{3x}}(x_3, y_3, V_{x_3})$ (см. рис. 2).

Для нахождения проекции V_{y_0} аналогично, в трехмерном пространстве, обозначенном осями *OX*, *OY* и OV_y, изображены вектора: $\overline{r_{1y}}(x_1, y_1, V_{y_1})$, $\overline{r_{2y}}(x_2, y_2, V_{y_2})$, $\overline{r_{3y}}(x_3, y_3, V_{y_3})$.

Шаг 4. Вывод формул для V_{x_0} и V_{y_0}. Рассмотрим вывод формул для компоненты V_{x_0}. Для нахождения компоненты V_{y_0} они аналогичны, поэтому опускаются. Через три точки с координатами (x_1, y_1, V_{x_1}), (x_2, y_2, V_{x_2}), (x_3, y_3, V_{x_3}) можно однозначным образом провести плоскость. Найдем координаты нормали к такой плоскости. Известно, что если два, лежащих в одной плоскости, вектора перемножить векторно, то в результате получится вектор, перпендикулярный к плоскости, в которой лежат перемножаемые вектора. Используя это, найдем единичную нормаль $\overline{n}$ к данной плоскости, найдя векторное произведение векторов, лежащих в одной плоскости, поделенных на собственную длину. Таким образом, получаем выравнивание для V_{x_0} и V_{y_0}.

Для определения V_{x_0} найдем координаты нормали $\overline{n}$ к интерполяционной плоскости трехмерного пространства с осями *OX*, *OY* и OV_x, которой принадлежат вектора $(\overline{\overline{r_{2x}} - \overline{r_{1x}}})$ и $(\overline{\overline{r_{2x}} - \overline{r_{3x}}})$:

$$\left| \frac{(\overline{\overline{r_{2x}} - \overline{r_{1x}}})}{\left|\overline{\overline{r_{2x}} - \overline{r_{1x}}}\right|} \times \frac{(\overline{\overline{r_{2x}} - \overline{r_{3x}}})}{\left|\overline{\overline{r_{2x}} - \overline{r_{3x}}}\right|} \right| = (n_x, n_y, n_z) \equiv \overline{n}.$$

Аналогично, для определения V_{y_0} найдем координаты нормали $\overline{m}$ к интерполяционной плоскости трехмерного пространства с осями *OX*, *OY* и OV_y, которой принадлежат вектора $(\overline{\overline{r_{2y}} - \overline{r_{1y}}})$ и $(\overline{\overline{r_{2y}} - \overline{r_{3y}}})$:

$$\left| \frac{(\overline{\overline{r_{2y}} - \overline{r_{1y}}})}{\left|\overline{\overline{r_{2y}} - \overline{r_{1y}}}\right|} \times \frac{(\overline{\overline{r_{2y}} - \overline{r_{3y}}})}{\left|\overline{\overline{r_{2y}} - \overline{r_{3y}}}\right|} \right| = (m_x, m_y, m_z) \equiv \overline{m}.$$

Шаг 5. Уравнение плоскости, проходящей через вектор $(\overline{\overline{r_{0x}} - \overline{r_{1x}}})$, где вектор $\overline{r_{0x}}(x_0, y_0, V_{x_0})$ перпендикулярен нормали $\overline{n}$.

Исходя из того, что скалярное произведение двух перпендикулярных векторов равно нулю, получим уравнения, из которых можно выразить V_{x_0} и V_{y_0}.

Уравнение для нахождения V_{x_0}:

$$\left((\overline{\overline{r_{0x}} - \overline{r_{1x}}}) \cdot \overline{n}\right) = 0.$$

Раскрыв скобки, получаем: $(x_0 - x_1)n_x + (y_0 - y_1)n_y + (V_{x_0} - V_{x_1})n_z = 0$.

Уравнение для нахождения V_{y_0}:

$$\left((\overline{r_{0y}} - \overline{r_{1y}}) \cdot \overline{m}\right) = 0.$$

Раскрыв скобки, получаем: $(x_0 - x_1)m_x + (y_0 - y_1)m_y + (V_{y_0} - V_{y_1})m_z = 0.$

Шаг 6. Определение неизвестных значений V_{x_0} и V_{y_0}:

$$V_{x_0} = \frac{1}{n_z}\left(-(x_0 - x_1)n_x - (y_0 - y_1)n_y\right) + V_{x_1};$$

$$V_{y_0} = \frac{1}{m_z}\left(-(x_0 - x_1)m_x - (y_0 - y_1)m_y\right) + V_{y_1}.$$

В результате значения всех координат вектора $\overline{r_0}(x_0, y_0, V_{x_0}, V_{y_0})$ известны.

Шаг 7. Определение нового положения точки $(x_0; y_0)$. В конце первого интервала времени Δt (ранее указано, что Δt равно одному часу, $\Delta t = 1$ час) точка перейдет в положение с координатами $(x_{нов}; y_{нов})$:

$$x_{нов} = x_0 + V_{x_0} \cdot \Delta t;$$

$$y_{нов} = y_0 + V_{y_0} \cdot \Delta t.$$

Шаг 8. Для новой точки $(x_{нов}; y_{нов})$ снова определяем три самые близкие точки нерегулярной сети, т. е. выполняется шаг 1. А координатам точки $(x_0; y_0)$ присваиваются значения координат точки $(x_{нов}; y_{нов})$. Данный алгоритм рассмотрен только для одной точки пятна. Но он аналогично рассчитывается и для остальных точек, а также и вертикальной компоненты вектора скорости V_z при учете оседания более тяжелых частиц поллютанта. В результате на экране будет получена динамика движения поллютанта в водной среде с учетом поля течений на данный период: начальная форма пятна будет деформироваться, расплываться, перемешиваться с другими загрязнениями. Причем на границе пятна концентрация загрязняющего вещества будет гораздо меньше, чем в центре. Также на концентрацию влияет и время движения выброса, ветровая картина в данном регионе: чем больше времени прошло со времени начального разлива вещества, тем меньше его концентрация в поверхностном слое воды, так как происходит оседание частиц со скоростью, зависящей от их массы, перенос и перемешивание частиц течением. Результаты моделирования динамики движения пятен загрязнений показаны на рис. 3, 4.

Пример. Рассчитан пример для шага 1 алгоритма поиска трех ближайших векторов карты поля течений и перемещения точки пятна загрязнения в следующее расчетное положение. Необходимо вычислить: компоненты вектора скорости V_{x_0} и V_{y_0} в заданной точке с координатами $(x_0; y_0)$ и переместить точку в новое положение.

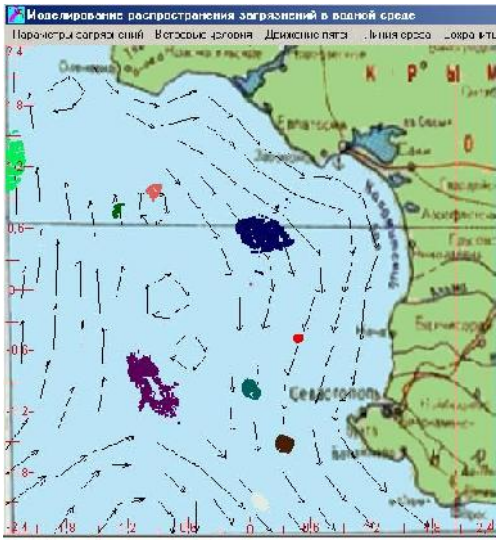


РИС. 3. Положение и форма пятен через 40 минут

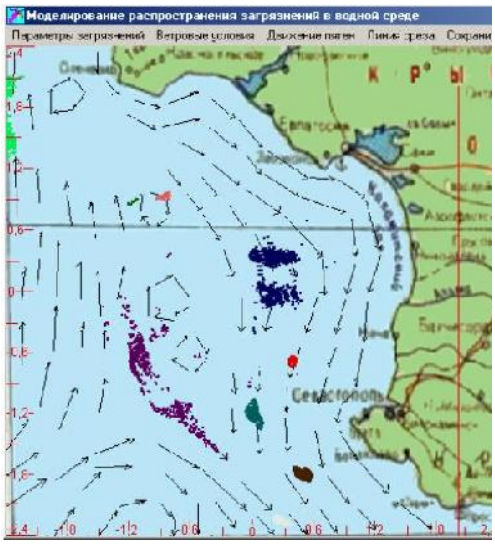


РИС. 4. Положение и форма пятен через 140 минут

Входные данные. Пусть заданы координаты начала и проекции четырех векторов карты поля течений, начинающихся в узлах регулярной сети (рис. 5):

вектор № 1: $x_1 = 2$; $y_1 = 1$; $V_{x_1} = -1$; $V_{y_1} = 1$;

вектор № 2: $x_2 = 2{,}5$; $y_2 = 1{,}75$; $V_{x_2} = -0{,}25$; $V_{y_2} = 0$;

вектор № 3: $x_3 = 2$; $y_3 = 2$; $V_{x_3} = 0$; $V_{y_3} = 0{,}25$;

вектор № 4: $x_4 = 1{,}5$; $y_4 = 1$; $V_{x_4} = -1$; $V_{y_4} = 1$,

и координаты точки поллютанта (или движущегося объекта) $(x_0; y_0)$:

$$x_0 = 2{,}25;\ y_0 = 1{,}25.$$

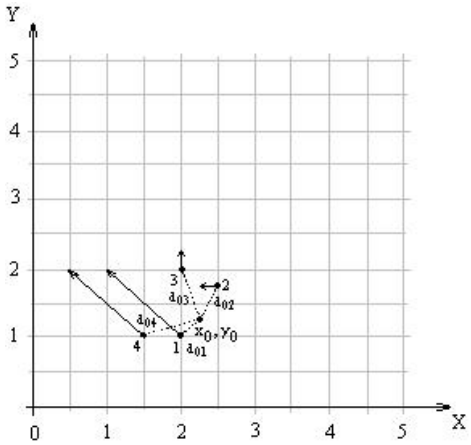
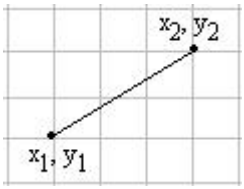


РИС. 5. Вектора заданной карты поля течений, положение точки пятна и расстояния от точки пятна до начальных точек векторов

Используя формулу расстояния между двумя точками:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$



определим четыре расстояния d_{01}, d_{02}, d_{03} d_{04} от точки поллютанта $(x_0; y_0)$ до точек начала (на рис. 5 точки пронумерованы соответственно 1, 2, 3, 4) четырех имеющихся в базе цифровой карты поля векторов $\overline{V}_1, \overline{V}_2, \overline{V}_3, \overline{V}_4$:

$$d_{01} = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2} = \sqrt{(2 - 2{,}25)^2 + (1 - 1{,}25)^2} =$$
$$= \sqrt{0{,}0625 + 0{,}0625} = \sqrt{0{,}125} = 0{,}3535;$$
$$d_{02} = \sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2} = \sqrt{(2{,}5 - 2{,}25)^2 + (1{,}75 - 1{,}25)^2} =$$
$$= \sqrt{0{,}0625 + 0{,}25} = \sqrt{0{,}3125} = 0{,}5590169;$$
$$d_{03} = \sqrt{(x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2} = \sqrt{(2 - 2{,}25)^2 + (2 - 1{,}25)^2} =$$
$$= \sqrt{0{,}0625 + 0{,}56250} = \sqrt{0{,}625} = 0{,}790569;$$
$$d_{04} = \sqrt{(x_4 - x_0)^2 + (y_4 - y_0)^2} = \sqrt{(1{,}5 - 2{,}25)^2 + (1 - 1{,}25)^2} =$$
$$= \sqrt{0{,}5625 + 0{,}0625} = \sqrt{0{,}625} = 0{,}790569.$$

Минимальные три расстояния: d_{01}, d_{02}, d_{03} (d_{03} и d_{04} одинаковы, по условию алгоритма выбираем то, которое имеет меньший номер последовательности, т. е. раньше встретилось при переборе).

Таким образом, далее в расчетах участвуют три вектора:

$$\overline{r_{1x}}(x_1, y_1, V_{x1}), \quad \overline{r_{2x}}(x_2, y_2, V_{x2}), \quad \overline{r_{3x}}(x_3, y_3, V_{x3}).$$

Запишем формулу для поиска координат нормали:

$$\overline{n} = \left| \frac{(\overline{\overline{r_{2x}} - \overline{r_{1x}}})}{\left|\overline{\overline{r_{2x}} - \overline{r_{1x}}}\right|} \times \frac{(\overline{\overline{r_{2x}} - \overline{r_{3x}}})}{\left|\overline{\overline{r_{2x}} - \overline{r_{3x}}}\right|} \right| = (n_x, n_y, n_z). \qquad (1)$$

Для краткости введем вектора $\overline{c}$ и $\overline{d}$ и найдем их координаты:

$$\overline{c} = \overline{\overline{r_{2x}} - \overline{r_{1x}}} = (x_2 - x_1;\ y_2 - y_1;\ V_{x2} - V_{x1}) =$$
$$= (2{,}5 - 2;\ 1{,}75 - 1;\ -0{,}25 - (-1)) = (0{,}5;\ 0{,}75;\ 0{,}75),$$

$$\bar{d} = \overline{\overline{r_{2x}} - \overline{r_{3x}}} = \left(x_2 - x_3;\ y_2 - y_3; V_{x2} - V_{x3}\right) =$$
$$= \left(2{,}5 - 2; 1{,}75 - 2; -0{,}25 - 0\right) = \left(0{,}5; -0{,}25; -0{,}25\right).$$

Вычислим векторное произведение векторов $\bar{c}$ и $\bar{d}$, пользуясь формулой:

$$\bar{c} \times \bar{d} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ c_x & c_y & c_z \\ d_x & d_y & d_z \end{vmatrix} = \bar{i}\left(c_y d_z - c_z d_y\right) - \bar{j}\left(c_x d_z - c_z d_x\right) + \bar{k}\left(c_x d_y - c_y d_x\right) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \bar{c} \times \bar{d} = \left\{c_y d_z - c_z d_y;\ c_z d_x - c_x d_z; c_x d_y - c_y d_x\right\}. \qquad (2)$$

Разделим вектора $\bar{c}$ и $\bar{d}$ на их длины $\left|\bar{c}\right|$ и $\left|\bar{d}\right|$ соответственно для получения вектора единичной длины согласно (1), для этого введем вспомогательные вектора $\bar{C}$ и $\bar{D}$:

$$\bar{C} = \frac{\bar{c}}{\left|\bar{c}\right|} = \left(\frac{0{,}5}{1{,}172}; \frac{0{,}75}{1{,}172}; \frac{0{,}75}{1{,}172}\right) = \left(0{,}4266; 0{,}6399; 0{,}6399\right) = 1{,}0004 \approx 1;$$

$$\bar{D} = \frac{\bar{d}}{\left|\bar{d}\right|} = \left(\frac{0{,}5}{0{,}61237}; \frac{-0{,}25}{0{,}61237}; \frac{-0{,}25}{0{,}61237}\right) =$$
$$= \left(0{,}81649; -0{,}408249; -0{,}408249\right) = 0{,}999995 \approx 1.$$

Векторное произведение:

$$\bar{C} \times \bar{D} = \left\{c_y d_z - c_z d_y;\ c_z d_x - c_x d_z; c_x d_y - c_y d_x\right\} =$$
$$= \{0{,}6399 \cdot (-0{,}408249) - 0{,}6399 \cdot (-0{,}408249);$$
$$0{,}6399 \cdot 0{,}81649 - 0{,}4266 \cdot (-0{,}408249);$$
$$0{,}4266 \cdot (-0{,}408249) - 0{,}6399 \cdot 0{,}81649\} =$$
$$= \left\{-0{,}26123 + 0{,}26123;\ 0{,}52247 + 0{,}17417; -0{,}174159 - 0{,}52247\right\} =$$
$$= \left\{0;\ 0{,}69664; -0{,}696629\right\}.$$

Получены координаты единичной нормали $\bar{n} = \left(0;\ 0{,}69664; -0{,}696629\right)$.

$$\left|\bar{n}\right| = 0{,}9851899 \approx 1.$$

Таким образом находим проекцию V_{x_0} искомого вектора $\bar{V}_0$ в точке $(x_0; y_0)$:

$$V_{x_0} = \frac{1}{n_z}\left(-(x_0 - x_1)n_x - (y_0 - y_1)n_y\right) + V_{x_1} =$$
$$= \frac{1}{-0{,}696629}\left(-(2{,}25 - 2) \cdot 0 - (1{,}25 - 1) \cdot 0{,}69664\right) + (-1) =$$
$$= 1{,}43548 \cdot \left(0{,}17416\right) - 1 = -0{,}75.$$

Аналогично для нахождения проекции V_{y_0} найдем координаты нормали $\overline{m}$:

$$\overline{m} = \left| \frac{(\overline{\overline{r_{2y}} - \overline{r_{1y}}})}{\left|\overline{\overline{r_{2y}} - \overline{r_{1y}}}\right|} \times \frac{(\overline{\overline{r_{2y}} - \overline{r_{3y}}})}{\left|\overline{\overline{r_{2y}} - \overline{r_{3y}}}\right|} \right| = (m_x, m_y, m_z).$$

Введем вспомогательные вектора:

$$\overline{a} = \overline{\overline{r_{2y}} - \overline{r_{1y}}} = \left(x_2 - x_1;\ y_2 - y_1; V_{y_2} - V_{y1}\right) =$$

$$= (2{,}5 - 2; 1{,}75 - 1; 0 - 1) = (0{,}5; 0{,}75; -1);$$

$$\overline{b} = \overline{\overline{r_{2y}} - \overline{r_{3y}}} = \left(x_2 - x_3;\ y_2 - y_3; V_{y_2} - V_{y3}\right) =$$

$$= (2{,}5 - 2; 1{,}75 - 2; 0 - 0{,}25) = (0{,}5; -0{,}25; -0{,}25);$$

$$\left|\overline{a}\right| = 1{,}34629;$$

$$\overline{A} = \frac{\overline{a}}{\left|\overline{a}\right|} = \left(\frac{0{,}5}{1{,}34629}; \frac{0{,}75}{1{,}34629}; \frac{-1}{1{,}34629}\right) =$$

$$= (0{,}37139; 0{,}55708; -0{,}74278) = 0{,}9999953 \approx 1;$$

$$\left|\overline{b}\right| = 0{,}61237;$$

$$\overline{B} = \frac{\overline{b}}{\left|\overline{b}\right|} = \left(\frac{0{,}5}{0{,}61237}; \frac{-0{,}25}{0{,}61237}; \frac{-0{,}25}{0{,}61237}\right) =$$

$$= (0{,}81649; -0{,}408249; -0{,}408249) = 0{,}9999952 \approx 1.$$

Векторные произведения:

$$\overline{A} \times \overline{B} = \left\{a_y b_z - a_z b_y; a_z b_x - a_x b_z; a_x b_y - a_y b_x\right\} =$$

$$= \{0{,}55708 \cdot (-0{,}408249) - (-0{,}74278) \cdot (-0{,}408249);$$

$$-0{,}74278 \cdot 0{,}81649 - 0{,}37139 \cdot (-0{,}408249);$$

$$0{,}37139 \cdot (-0{,}408249) - 0{,}55708 \cdot 0{,}81649\} =$$

$$= \{-0{,}22742 - 0{,}30323; -0{,}60647 + 0{,}151619;$$

$$-0{,}151619 - 0{,}4548502\} =$$

$$= \{-0{,}53065; -0{,}454851; -0{,}6064692\} = 0{,}92535587 \approx 1.$$

Получены координаты единичной нормали $\overline{m}$:

$$\overline{m} = (-0{,}53065; -0{,}454851; -0{,}6064692).$$

Проекция V_{y_0} искомого вектора $\overline{V}_0$:

$$V_{y_0} = \frac{1}{m_z}\left(-(x_0 - x_1)m_x - (y_0 - y_1)m_y\right) + V_{y_1} =$$

$$= -\frac{1}{0{,}6064692}\left(-(2{,}25-2)\cdot(-0{,}53065) - (1{,}25-1)\cdot(-0{,}454851)\right) + 1 =$$

$$= -1{,}648\cdot(0{,}13266 + 0{,}11371) + 1 = 0{,}5939.$$

Новое положение точки центра пятна через время $\Delta t = 0{,}1$:

$$x_{нов} = x_0 + V_{x_0}\cdot\Delta t = 2{,}25 + (-0{,}75)\cdot 0{,}1 = 2{,}25 - 0{,}075 = 2{,}175;$$

$$y_{нов} = y_0 + V_{y_0}\cdot\Delta t = 1{,}25 + 0{,}5939\cdot 0{,}1 = 1{,}3.$$

Таким образом, новое положение точки через $\Delta t = 0{,}1$:

$$(x_{нов}; y_{нов}) = (2{,}175; 1{,}3).$$

Выводы. Предложена интерполяционная процедура прогнозного расчета миграции поллютантов в акватории, обеспечивающая прогнозную оценку мероприятий предупреждения техно-экологического происшествия или нейтрализации его последствий [2 – 4]. Для имитационного моделирования процесса миграции используется карта поля течений, получаемая на основе решения конечно-разностным методом начально-краевой задачи уравнений Навье –Стокса. Рассчитан подробный пример, который может быть использован для профессионального обучения студентов младших курсов высших учебных технических заведений.

В.Г. Писаренко, Ю.В. Писаренко

ІНТЕРПОЛЯЦІЙНА ПРОЦЕДУРА ПРОГНОЗНОГО РОЗРАХУНКУ РУХУ ПОЛЮТАНТІВ У АКВАТОРІЇ

Описано інтерполяційну процедуру прогнозного розрахунку міграції полютантів у акваторії, що забезпечує оцінку заходів попередження техно-екологічної події або нейтралізації її наслідків.

V.G. Pisarenko, J.V. Pisarenko

INTERPOLATION PROCEDURE FOR FORECASTED CALCULATION OF POLLUTANT MOTION IN AQUATORIA

An interpolation procedure for the forecasted calculation of pollutant migration in a water area is described, which provides an assessment of measures to prevent a techno-ecological accident or neutralize its consequences.

1. *Бэтчелор Дж.* Введение в динамику жидкости. М.: Мир. 1973. 760 с.
2. *Писаренко В.Г., Писаренко Ю.В.* Некоторые задачи проектирования геоинформационных систем прогнозирования метеобедствий. Киев: ООО «Аримойя». 2002. 105 с.
3. *Писаренко Ю.В.* Виртуальное проектирование интеллектуализированных роботов для разведки и нейтрализации опасных экологических происшествий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Киев, 2006. 20 с.
4. *Писаренко В.Г., Сидоренко В.И., Писаренко Ю.В.* Компоненты информационно-аналитической системы прогнозирования наводнений в предгорьях из-за быстрого снеготаяния. *Искусственный интеллект.* 2012. № 4. С. 97 – 103.

Получено 27.03.2017

Об авторах:

Писаренко Валерий Георгиевич,
доктор физико-математических наук, заведующий отделом
Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины,

Писаренко Юлия Валериевна,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник
Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины.