

4-бөлім

Раздел 4

Section 4

Қолданылмалы  
математикаПрикладная  
математикаApplied  
Mathematics

УДК 519.63; 665.6/.7; 614.8.027.1

Асылбекулы А.\* , Абдибекова А.У., Жумагулов Б.Т.

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Республика Казахстан, г. Алматы  
E-mail: \*asylbekuly@mail.ru

### Математическое моделирование миграций нефтяного пятна и оценка ареала на поверхности Каспийского моря в зависимости от метеоусловий

В данной работе рассматривается процесс разлива и миграция горючего топлива – нефти в Каспийском море в зависимости от метеоусловий. Как правило, экологам, осуществляющим анализ данной чрезвычайной ситуации, необходимо знать в каком направлении будет двигаться нефтяное пятно, образовавшееся в результате разлива, какую площадь займет нефтяное пятно, как изменится состав нефти, какой объем нефти испарится и ряд других вопросов, на которые можно ответить с использованием математического моделирования. Теоретическая основа математической модели для рассматриваемого процесса составляют уравнения гидродинамики моря, уравнения переноса и изменения концентрации компонентов нефти, а также учитывается уравнение неразрывности, выражающее собой неизменность общего количества массы вылитой нефти, образовавшей пленку на поверхности моря. В результате определена траектория миграции, изменение концентрации и температуры нефтяного пятна на поверхности моря со стационарного источника в зависимости от метеоусловий. Данная модель позволяет рассчитывать площадь и определять траекторию миграции нефтяного пятна по акваторию Каспийского моря в зависимости от метеоусловий, а также проводить численное моделирование разливов нефти в открытое море при различных начальных массах разлитой нефти.

**Ключевые слова:** разлив нефти, нефтяное пятно, Каспийское море, охрана окружающей среды, метеоусловия, математическое моделирование.

Assylbekuly A., Abdibekova A.U., Zhumagulov B.T.

### Mathematical modeling of oil spill migration on the surface of the Caspian Sea depending on weather conditions.

This paper considers the process of filling and migration of fossil fuels - oil - in the Caspian Sea, depending on the weather conditions. As a rule, for environmentalists performing analysis of the emergency, it is necessary to know in which direction will move the oil slick, formed because of the spill, how to change the composition of the oil, how much oil will evaporate and a number of other questions that can be answered using mathematical modeling. The theoretical basis of a mathematical model for the process consists of the hydrodynamics equations of the sea, equations of transfer and changes in the concentration of the oil component, as well as the continuity equation is taken into account, expressing the an invariance of the total amount of mass of poured oil, which have formed a film on the surface of the sea. As a result, the migration trajectory, the change in concentration and temperature of the oil slick on the sea surface from a fixed source, depending on weather conditions are defined. This model allows to calculate the area and determine the migration trajectory of the oil slick on the Caspian sea depending on the weather conditions, and carry out the numerical simulation of oil spills in the open sea at different initial masses of spilled oil.

**Key words:** oil spill, the Caspian Sea, oil slick, the environment, weather conditions, mathematical modeling.

Асылбекұлы А., Абдибекова А.У., Жумағұлов Б.Т.

### **Каспий теңізі бетінде ауа райы жағдайына байланысты мұнай дағының таралу аймағының бағалауын және орын ауысуын математикалық модельдеу**

Бұл жұмыста Каспий теңізінде ауа райы жағдайына байланысты мұнай төгілуін және жанар отынның орын ауысу процестері қарастырылады. Әдетте төтенше жағдайды талдау кезінде, экологтарға төгілу нәтижесінде пайда болған мұнай дағының қай бағытта жылжитынын, мұнай дағының қандай аймақ алатындығын, мұнайдың құрамы қалай өзгерегіндігін, мұнайдың қандай бөлігі буланатындығын білу қажет, осындай және басқа да бірқатар мәселелер туғызатын сұрақтарға математикалық модельдеу арқылы жауап беруге болады. Қарастырылатын процесс үшін математикалық модельдердің теориялық негізі гидродинамика теңдеулері, тасымал теңдеуі және мұнай компоненттері қоспасының теңдеуі, сондай-ақ теңіз бетіне төгілген мұнайдың салдарынан пайда болған қабықтың жалпы массасының саны өзгермеуін білдіретін үзіліссіздік теңдеуі есепке алынады. Нәтижесінде ауа райы жағдайына байланысты теңіз бетіне стационарлы көзден төгілген мұнай дағының орын ауысу траекториясы, температурасы мен қоспасының өзгерісі анықталды. Бұл модель Каспий теңізі акваториясында ауа райы жағдайына байланысты мұнай дағының орын ауысу траекториясын анықтауға және төгілген мұнай дағының аймағын есептеуге, сондай-ақ бастапқы массасы әр түрлі болатын мұнайдың ашық теңізде төгілуін сандық модельдеуге мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** мұнай төгілуі, мұнай дағы, Каспий теңізі, қоршаған ортаны қорғау, ауа райы жағдайлары, математикалық модельдеу.

## **1 Введение**

Разливы нефти имеют огромный потенциал для причинения серьезного вреда морской среде и способны вызвать широкий экономический и экологический ущерб. Исследование методов и средств ликвидации последствий аварий, а также методы, которые могут быть приняты, чтобы избежать аварийных ситуаций и применение их на практике является сегодня особо актуальной задачей.

Северный Каспий занимает всего 0.5% от общего объема воды в море. В результате интенсификации процессов освоения углеводородного сырья как в прибрежной, так и в шельфовой зоне, море подвергается загрязнению нефтепродуктами и сопутствующим им токсикантами. Кроме того, Каспийское море принимает стоки рек, несущих с собой различные загрязняющие вещества. Всё это определяет повышенный уровень антропогенной загрязненности моря. Как известно, нефтяная отрасль по глубине и многообразию негативных воздействий на окружающую среду превосходит все другие отрасли топливно-энергетического комплекса. Наиболее ощутимо эти воздействия проявляются в условиях добычи, подготовки, переработки и транспорта углеводородного сырья и нефтепродуктов [1-3].

Источники загрязнения Каспия многообразны и расположены на территории всех Прикаспийских государств, включая их морские акватории. Большую потенциальную угрозу для Каспия из-за подъёма уровня моря представляют законсервированные нефтяные скважины и прибрежные нефтепромыслы, аварии на разведочных скважинах и транспортных средствах, а также трансграничный перенос загрязняющих веществ (металлов, нефтепродуктов и т.д.) по рекам Волга, Урал и др.

В данной работе рассматривается процесс разлива и миграция горючего топлива – нефти в Каспийском море в зависимости от метеоусловий. Как правило, экологам, осуществляющим анализ данной чрезвычайной ситуации, необходимо знать в каком направлении будет двигаться нефтяное пятно, образовавшееся в результате разлива, ка-

кую площадь займет нефтяное пятно, как изменится состав нефти, какой объем нефти испарится и ряд других вопросов, на которые можно ответить с использованием математического моделирования [4].

## 2 Постановка задачи

Теоретическую основу математических моделей для рассматриваемого процесса растекания нефтяного пятна основана на решении уравнения импульса для смеси, уравнения неразрывности для смеси, уравнения переноса концентрации:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + f + \rho Q^V \mathbf{v}, \\ \nabla \cdot \mathbf{v} = Q^V, \\ \frac{\partial c_k}{\partial t} + \nabla \cdot (c_k \mathbf{v}_k) = F_k, \quad k = 1 \dots N \end{cases} \quad (1)$$

где  $F_k = \frac{k_1 x_k p_k \Delta t M}{RT}$  – испарение;  $k_1$  – коэффициент массопередачи;  $x_k$  – доля  $k$ -го компонента нефти;  $p_k$  – давление насыщенных паров для  $k$ -го компонента нефти;  $\Delta t$  – рассматриваемый временной промежуток;  $M$  – молярная масса;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура воздуха;  $\mathbf{v}_k$  – скорость движения компоненты;  $\mathbf{v}$  – скорость смеси;  $Q_k^M$  – массовый источник, который определяется химическими превращениями,  $\sum_{k=1}^N Q_k^M = 0$ ;  $p$  – давление;  $f = (0, -\rho g)$  – вектор внешних сил;  $g$  – ускорение свободного падения.

Объемный источник смеси:

$$Q^V = \sum_{k=1}^N \frac{1}{\rho_k^0} Q_k^M \quad (2)$$

В качестве скорости смеси  $\mathbf{v}$  берется среднеобъемная скорость:

$$\mathbf{v} = \sum_{k=1}^N c_k \mathbf{v}_k \quad (3)$$

## 3 Численный метод

Численная реализация составленной модели имеет следующий алгоритм: на первом этапе решается уравнение Навье-Стокса без учета давления, на втором этапе решается уравнение Пуассона, полученное из уравнения неразрывности с учетом поля скоростей первого этапа, при использовании матричной прогонки. Полученное поле давления на следующем этапе используется для пересчета окончательного поля скоростей [5]. На последнем этапе по найденному полю скоростей решается уравнение для получения концентрации компонентов вязкой жидкости.

Промежуточное поле скорости находится при использовании схемы Кранка-Николсона в комбинации с методом пятиточечной прогонки.

Рассмотрим горизонтальную составляющую компоненты скорости  $u_1$  в точке сетки  $(i + \frac{1}{2}j)$ .

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + \frac{\partial (u_1 u_1)}{\partial x_1} + \frac{\partial (u_1 u_2)}{\partial x_2} = \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} \right) \quad (4)$$

При применении схемы Кранка-Николсона уравнение (4) примет вид:

$$\begin{aligned} u_{1i+\frac{1}{2}j}^{*n+1} - u_{1i+\frac{1}{2}j}^n &= -\frac{3t}{2} [hx]_{i+\frac{1}{2}j}^n + \frac{t}{2} [hxp]_{i+\frac{1}{2}j}^{n-1} + t [ax]_{i+\frac{1}{2}j}^n + \\ &+ \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left( \frac{\partial^2 u_1^*}{\partial x_1^2} \right)_{i+\frac{1}{2}j}^{n+1} + \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left( \frac{\partial^2 u_1^*}{\partial x_2^2} \right)_{i+\frac{1}{2}j}^{n+1} \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$[hx]_{i+\frac{1}{2}j}^n = \left( \frac{\partial u_1 u_1}{\partial x_1} \right)_{i+\frac{1}{2}j}^n + \left( \frac{\partial u_1 u_2}{\partial x_2} \right)_{i+\frac{1}{2}j}^n$$

$$[hxp]_{i+\frac{1}{2}j}^{n-1} = \left( \frac{\partial u_1 u_1}{\partial x_1} \right)_{i+\frac{1}{2}j}^{n-1} + \left( \frac{\partial u_1 u_2}{\partial x_2} \right)_{i+\frac{1}{2}j}^{n-1}$$

$$[ax]_{i+\frac{1}{2}j}^n = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left[ \left( \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_1^2} \right)_{i+\frac{1}{2}j}^n + \left( \frac{\partial^2 u_1}{\partial x_2^2} \right)_{i+\frac{1}{2}j}^n \right]$$

Далее левую часть уравнения (5) обозначим через  $q_{i+\frac{1}{2}j}$

$$q_{i+\frac{1}{2}j} \equiv u_{1i+\frac{1}{2}j}^{*n+1} - u_{1i+\frac{1}{2}j}^n \quad (6)$$

Найдем  $u_{1i+\frac{1}{2}j}^{*n+1}$  из уравнения (6)

$$u_{1i+\frac{1}{2}j}^{*n+1} = q_{i+\frac{1}{2}j} + u_{1i+\frac{1}{2}j}^n$$

Заменив все  $u_{1i+\frac{1}{2}j}^{*n+1}$  из уравнения (5) получим

$$\begin{aligned} q_{i+\frac{1}{2}j} - \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left( \frac{\partial^2 q}{\partial x_1^2} \right)_{i+\frac{1}{2}j} - \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left( \frac{\partial^2 q}{\partial x_2^2} \right)_{i+\frac{1}{2}j} &= \\ &= -\frac{3t}{2} [hx]_{i+\frac{1}{2}j}^n + \frac{t}{2} [hxp]_{i+\frac{1}{2}j}^{n-1} + 2 \cdot t [ax]_{i+\frac{1}{2}j}^n \end{aligned} \quad (7)$$

Приведем уравнение (7) в вид

$$\left[1 - \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} - \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}\right] q_{i+\frac{1}{2}j} = d_{i+\frac{1}{2}j} \quad (8)$$

где

$$d_{i+\frac{1}{2}j} = -\frac{3t}{2} [hx]_{i+\frac{1}{2}j}^n + \frac{t}{2} [hxp]_{i+\frac{1}{2}j}^{n-1} + 2 \cdot t [ax]_{i+\frac{1}{2}j}^n$$

Чтобы получить второй порядок точности по времени напишем

$$\left[1 - \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x_1^2}\right] \left[1 - \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}\right] q_{i+\frac{1}{2}j} = d_{i+\frac{1}{2}j} \quad (9)$$

Чтобы определить  $q_{i+\frac{1}{2}j}$  уравнение (9) решается в 2-х этапах.

$$\left[1 - \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x_1^2}\right] A_{i+\frac{1}{2}j} = d_{i+\frac{1}{2}j}$$

$$\left[1 - \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}\right] q_{i+\frac{1}{2}j} = A_{i+\frac{1}{2}j}$$

На первом этапе  $A_{i+\frac{1}{2}j}$  ищется в направлении координаты  $x_1$  :

$$\left[1 - \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x_1^2}\right] A_{i+\frac{1}{2}j} = d_{i+\frac{1}{2}j}$$

$$A_{i+\frac{1}{2}j} - \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x_1^2}\right)_{i+\frac{1}{2}j} = d_{i+\frac{1}{2}j}$$

$$A_{i+\frac{1}{2}j} - \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{-A_{i+\frac{5}{2}j} + 16 \cdot A_{i+\frac{3}{2}j} - 30 \cdot A_{i+\frac{1}{2}j} + 16 \cdot A_{i-\frac{1}{2}j} - A_{i-\frac{3}{2}j}}{12\Delta x_1^2} = d_{i+\frac{1}{2}j}$$

$$s_1 \cdot A_{i+\frac{5}{2}j} - 16 \cdot s_1 \cdot A_{i+\frac{3}{2}j} + (1 + 30 \cdot s_1) \cdot A_{i+\frac{1}{2}j} - 16 \cdot s_1 \cdot A_{i-\frac{1}{2}j} + s_1 \cdot A_{i-\frac{3}{2}j} = d_{i+\frac{1}{2}j} \quad (10)$$

где  $s_1 = \frac{t}{24 \cdot \text{Re} \cdot \Delta x_1^2}$

Данное уравнение (10) решается методом пятиточечной прогонки, в результате применения которого находится  $A_{i+\frac{1}{2}j}$ .

На втором этапе  $q_{i+\frac{1}{2}j}$  ищется в направлении координаты  $x_2$  :

$$\left[1 - \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{\partial^2}{\partial x_2^2}\right] q_{i+\frac{1}{2}j} = A_{i+\frac{1}{2}j}$$

$$q_{i+\frac{1}{2}j} - \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left(\frac{\partial^2 q}{\partial x_2^2}\right)_{i+\frac{1}{2}j} = A_{i+\frac{1}{2}j}$$

$$q_{i+\frac{1}{2}j} - \frac{t}{2} \cdot \frac{1}{\text{Re}} \cdot \frac{-q_{i+\frac{1}{2}j+2} + 16 \cdot q_{i+\frac{1}{2}j+1} - 30 \cdot q_{i+\frac{1}{2}j} + 16 \cdot q_{i+\frac{1}{2}j-1} - q_{i+\frac{1}{2}j-2}}{12\Delta x_2^2} = A_{i+\frac{1}{2}j}$$

$$s \cdot q_{i+\frac{1}{2}j+2} - 16 \cdot s \cdot q_{i+\frac{1}{2}j+1} + (1 + 30 \cdot s) \cdot q_{i+\frac{1}{2}j} - 16 \cdot s \cdot q_{i+\frac{1}{2}j-1} + s \cdot q_{i+\frac{1}{2}j-2} = A_{i+\frac{1}{2}j} \quad (11)$$

где  $s = \frac{t}{24 \cdot \text{Re} \cdot \Delta x_2^2}$

Данное уравнение (11) решается методом пятиточечной прогонки, в результате применения которого находится  $q_{i+\frac{1}{2}j}$ .

После того как мы определили значение  $q_{i+\frac{1}{2}j}$  мы находим  $u_{1i+\frac{1}{2}j}^{*n+1}$ .

$$u_{1i+\frac{1}{2}j}^{*n+1} = q_{i+\frac{1}{2}j} + u_{1i+\frac{1}{2}j}^n$$

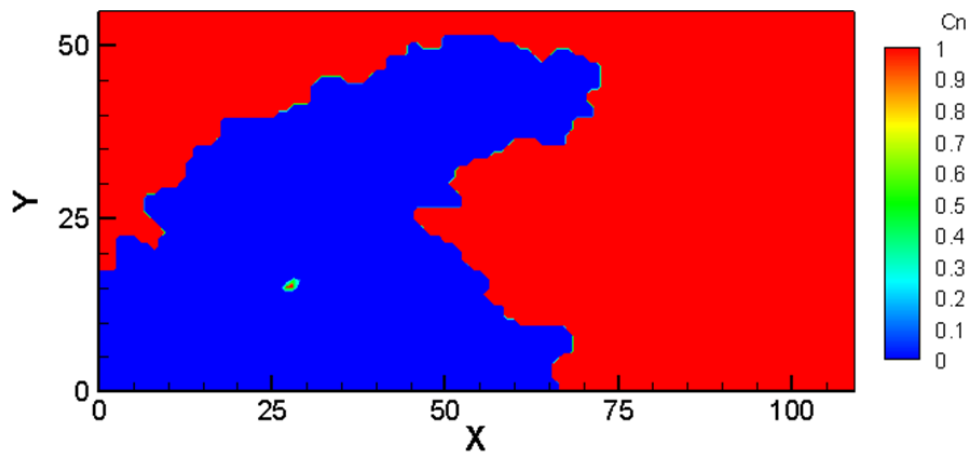
Компонент скорости  $u_{2ij+\frac{1}{2}}^{*n+1}$  находится аналогично.

Разработанная математическая модель и алгоритм ее реализации – на основе произведенных расчетов с реальными и актуальными данными позволяет определить траектория миграции нефтяного пятна. В результате моделирования стало возможным получать максимально объективные данные, столь необходимые для прогноза. С применением, реальных данных преобразованных векторных ветров в табличные данные, адаптированных для расчетов, позволило определить траекторию растекания и определить будущее местонахождение нефтяного пятна. Опережающее определение местонахождение нефтяного разлива эффективно ускоряет процесс реагирования специалистов по чрезвычайным ситуациям техногенного характера, что позволит уменьшить последственный ущерб экологического загрязнения.

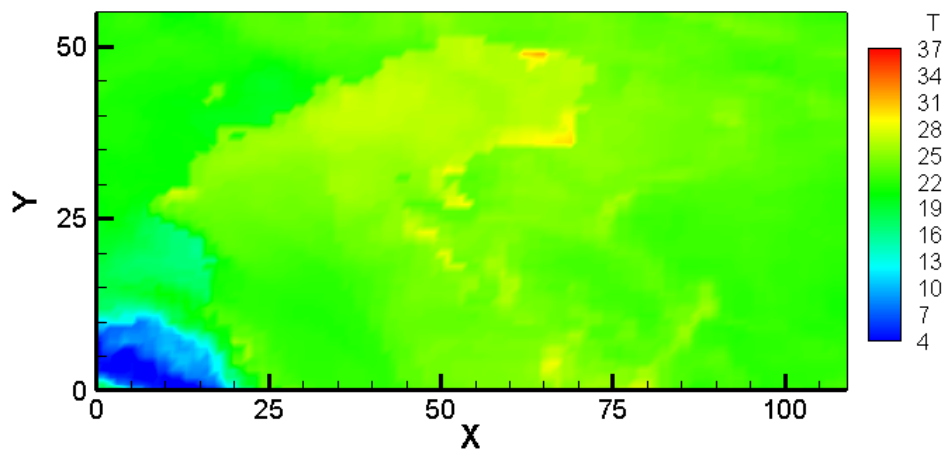
#### 4 Результаты моделирования

Таким образом, на основе разработанной математической модели произведен расчет движения нефтяного пятна в зависимости от направления ветра и температуры воздуха; установлено изменение концентрации каждого компонента нефти в результате испарения; изменение толщины, площади и массы нефтяного пятна; определена траектория движения пятна в зависимости от направления ветра.

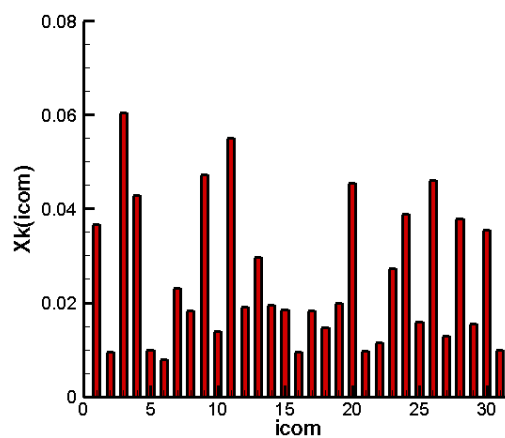
Был построен программный модуль для преобразования и считывания реальных метеорологических данных в вычислительные данные для применения в расчетах математического моделирования (Рисунки 1 - 9). Таким образом, разработан актуальный программный модуль основанный на реальных данных метеоусловий.



**Рисунок 1** - Распределение массы вылитой нефти, ее движение с учетом изменений концентрации разлитого нефтяного пятна в Каспийском море по истечении 30 минут



**Рисунок 2** - Изменение температуры разлитого нефтяного пятна в Каспийском море по истечении 30 минут



**Рисунок 3** - Покомпонентное распределение разлитого нефтяного пятна в Каспийском море по истечении 30 минут

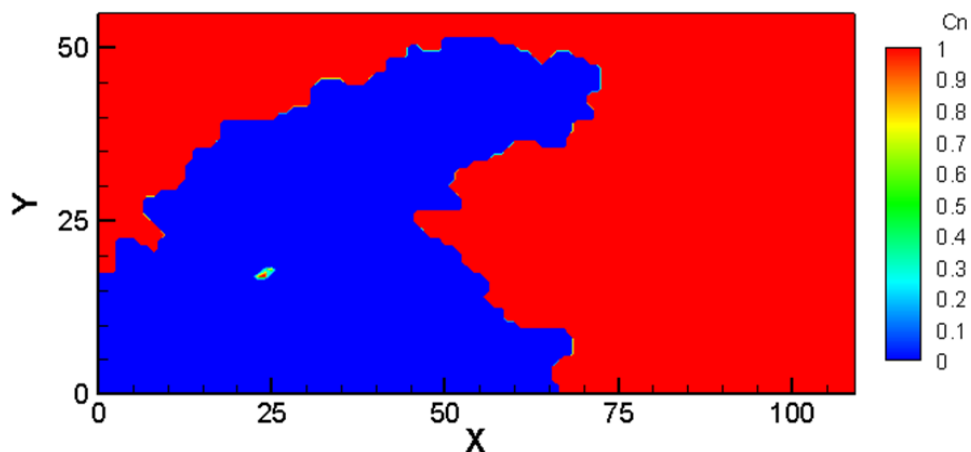


Рисунок 4 - Распределение массы вылитой нефти, ее движение с учетом изменений концентрации разлитого нефтяного пятна в Каспийском море по истечении 50 минут

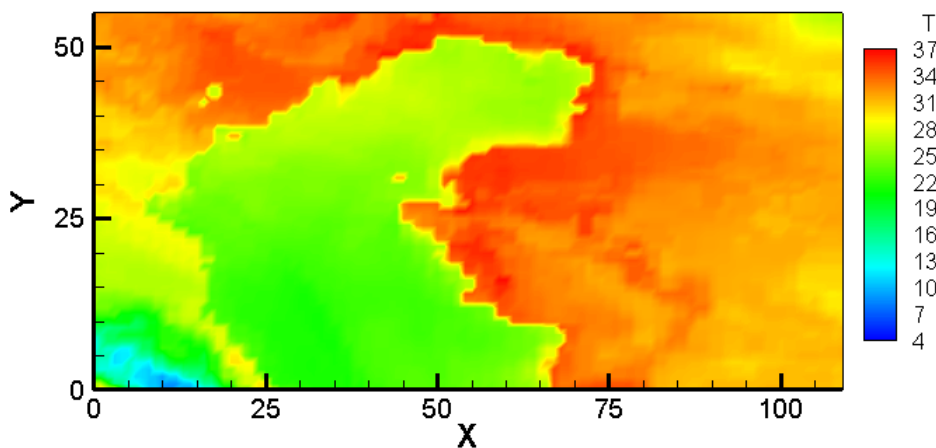


Рисунок 5 - Изменение температуры разлитого нефтяного пятна в Каспийском море по истечении 50 минут

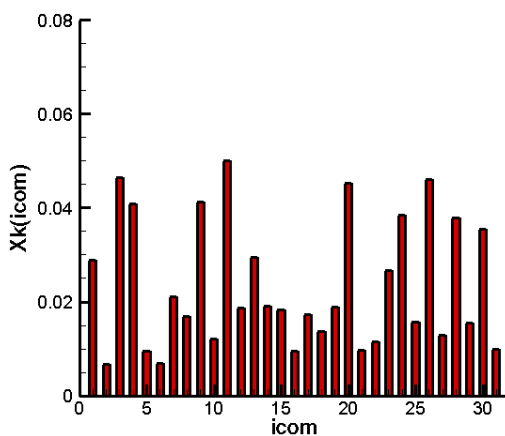
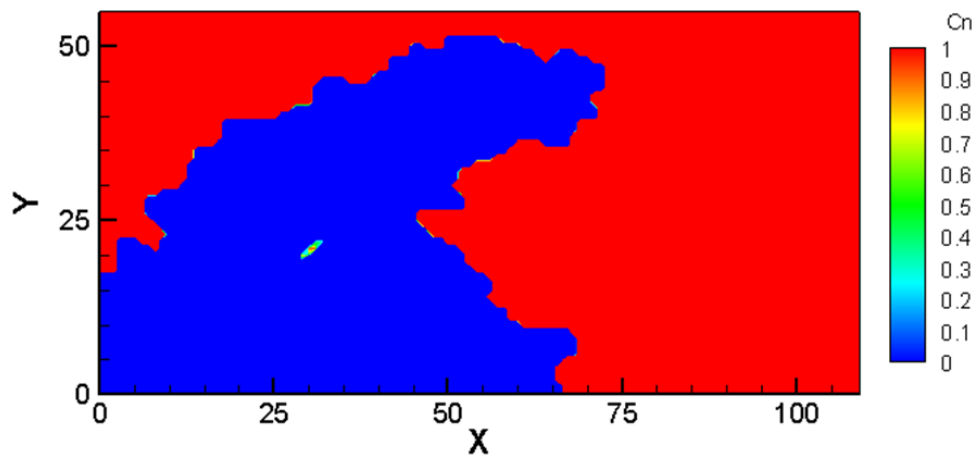
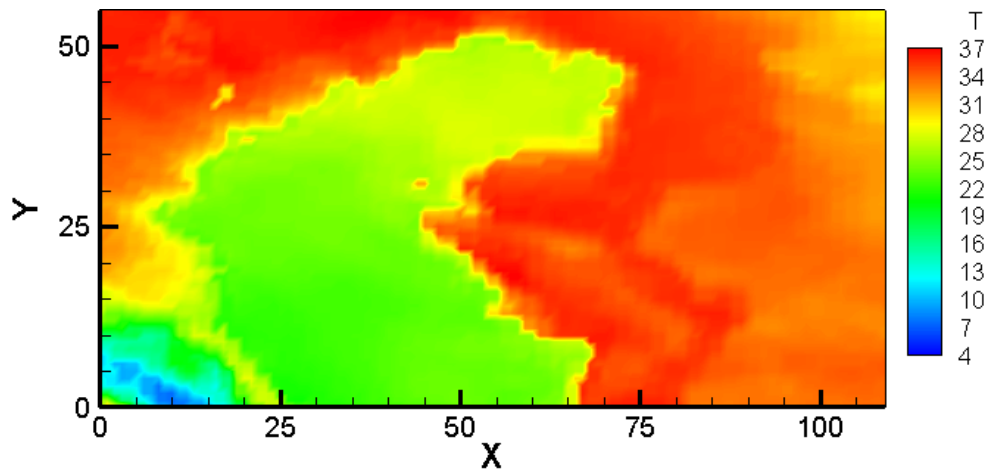


Рисунок 6 - Покомпонентное распределение разлитого нефтяного пятна в Каспийском море после истечения 50 минут

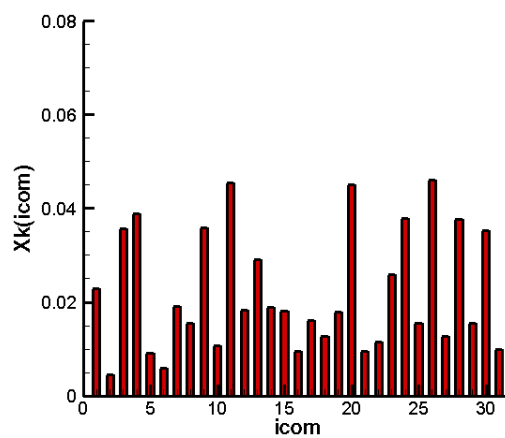




**Рисунок 7** - Распределение массы вылитой нефти, ее движение с учетом изменения концентрации разлитого нефтяного пятна в Каспийском море по истечении 1 час 10 минут.



**Рисунок 8** - Изменение температуры разлитого нефтяного пятна в Каспийском море по истечении 1 час 10 минут.



**Рисунок 9** - Покомпонентное распределение разлитого нефтяного пятна в Каспийском море по истечении 1 час 10 минут.

Наглядно представлено, что в зависимости от направления ветра меняется траектория движения пятна, от скорости ветра – зависит испарение отдельных компонентов нефти. Приняты следующие обозначения:  $i_{com}$  - компоненты рассматриваемой нефти,  $Xk(i_{com})$  - концентрация. Рисунки иллюстрируют результат о том, что при разливе нефти в море происходит изменение концентрации нефти за счет испарения, при этом сначала испаряются легкие фракции нефти, затем тяжелые, наравне с этим происходит изменение вязкости самой нефти.

При решении данной задачи, с целью демонстрации разработанной модели и получения объективных данных процесса были взяты за основу реальные метеорологические условия, что исключает искажение результатов моделирования. Был разработан программный модуль для преобразования метеорологических данных для построенной модели. По движению пятна, иллюстрация которого представлена на рисунках, указанных выше, можно судить о рассматриваемом направлении нефтяного пятна с учетом погодных условий.

Производя анализ результатов можно заключить, что на рисунках 1-3 иллюстрировано изменение, распределение концентрации, температуры нефтяного пятна с учетом ветра 7.8 м/с, что в результате указывает на сохранение исходной массы нефтяного пятна. На рисунках 4-6 указано время истечения 50 минут после аварийной ситуации, изменилась площадь распространения нефтяного пятна, где с учетом скорости восточно-западного ветра 9.3 м/с, отражены изменение концентрации разлитого нефтяного пятна, за счет испарения легкой фракции нефти на 0.3%, увеличилась концентрация тяжелой фракции, где масса нефти изменилась. На рисунках 7-9 виден результат воздействия скорости ветра 12.2 м/с, где испарение легкой фракции достигла значения 0.5%, а площадь растекания нефти увеличилась на 2 км<sup>2</sup>. Очевидно, что с увеличением концентрации высоковязких компонентов, процесс испарения замедляется.

Следует отметить преимущество разработанной математической модели и алгоритма ее реализации – в каждый момент времени, на основе реальных метеорологических данных и произведенных расчетов, можно дать информацию распространения в зависимости от направления и скорости ветра, что позволяет исследователям, занимающимся оценкой экологического ущерба, получить самый объективный результат процесса растекания нефти и нефтепродуктов.

## 5 Заключение

Таким образом, проведена разработка математической модели для реализации расчета и оценки ареала, определена траектория миграции нефтяного пятна на поверхности моря со стационарного источника в зависимости от метеоусловий. Разработанные модели распространения нефтяного пятна по поверхности морской воды позволяют рассчитать площадь и определять траекторию миграции нефтяного пятна по акваторию Каспийского моря в зависимости от метеоусловий, а также проводить численное моделирование разливов нефти в открытое море при различных сценариях, включающих различную начальную массу разлитой нефти, движение источника загрязнения, различные типы нефти, добываемые и транспортируемые через Каспийское море.

Работа выполнена при поддержке грантового финансирования научно-технических программ и проектов Комитетом науки МОН РК, грант №1905/ГФ4.

### Литература

- [1] *Mackay D., Lee S.Chi, Ma K., Shiu W.Y.* Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals. - Boca Raton: Taylor and Francis, 2006. - 4216 p.
- [2] *Boehm P.D., Fiest D.L., Mackay D., Paterson S.* Physical-chemical weathering of petroleum hydrocarbons from the IXTOC I blowout: chemical measurements and a weathering model // *Environ. Sci. Technol.* - 1982. -№16(8). -P. 498–505.
- [3] *Самойлов Н.А., Консейсао А.А.* Математическое моделирование испаряемости нефти и нефтепродуктов при их аварийных разливах // *Известия Самарского научного центра РАН, Самара, -2010. -№1(9). -С. 2251–2254.*
- [4] *Zhumagulov B.T., Monakhov V.N.* The Fluid dynamics of oil production: Translated & ed. by AgipK CO. - Milan: Interservice, 2003. - 307 p.
- [5] *Abdibekov U.S., Zhumagulov B.T., Zhakebaev D.B., Zhubat K.Z.* Modelling of the decay of isotropic turbulence by the LES // *Mathematical Models and Computer Simulations.* - 2013. -№4(5). -P 360–370.

### References

- [1] *Mackay D., Lee S.Chi, Ma K., Shiu W.Y.* Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals. - Boca Raton: Taylor and Francis, 2006. - 4216 p.
- [2] *Boehm P.D., Fiest D.L., Mackay D., Paterson S.* Physical-chemical weathering of petroleum hydrocarbons from the IXTOC I blowout: chemical measurements and a weathering model // *Environ. Sci. Technol.* - 1982. -№16(8). -P. 498–505.
- [3] *Samoilov N.A., Conceicao A.A.* Mathematical modeling of the evaporation of oil and petroleum products in the event of spills // *Proceedings of the Samara scientific center of RAS, Samara, -2010. -№1(9). -P. 2251–2254.*
- [4] *Zhumagulov B.T., Monakhov V.N.* The Fluid dynamics of oil production: Translated & ed. by AgipK CO. - Milan: Interservice, 2003. - 307 p.
- [5] *Abdibekov U.S., Zhumagulov B.T., Zhakebaev D.B., Zhubat K.Z.* Modelling of the decay of isotropic turbulence by the LES // *Mathematical Models and Computer Simulations.* - 2013. -№4(5). -P 360–370.