

Комитет науки Министерства образования и науки  
Республики Казахстан  
РГП «Институт информационных и вычислительных технологий»  
КН МОН РК



25 лет  
Независимости  
Республики Казахстан



25 лет  
Институту  
информационных и  
вычислительных  
технологий

**МАТЕРИАЛЫ**  
Международной научной конференции  
«Информатика и прикладная математика»  
(«Computer science and Applied Mathematics»),  
посвященной 25-летию Независимости Республики Казахстан и  
25-летию Института информационных и  
вычислительных технологий

**II часть**

г. Алматы, 21-24 сентября 2016 года

**Алматы  
2016**



<i>Mukanova B., Mirgalikyzy T., Tussipova M.</i>	Quantitative accounting of the impact of ground surface relief on problems of electrical tomography	196
<i>Mukhambetzhonov S.T., Haydar Akca, Janabekova S.K.</i>	Development of mathematical model of nonisothermal filtration in view of mass transfer processes	204
<i>Syzdykov M.</i>	Methodology to produce deterministic automaton for extended operators in regular expression	220
<i>Калимолдаев М.Н., Абдилдаева А.А., Галиева Ф.М.</i>	Сызықты емес регуляторлы фазалық жүйемен байланысты глобалды асимптотикалық орнықтылық	226
<i>Айдаров К.А., Балакаева Г.Т.</i>	Управление ресурсами в ЦОД через имитационное моделирование	233
<i>Асанова А.Т., Иманчиев А.Е., Кадирбаева Ж.М.</i>	О разрешимости многоточечной задачи для системы нагруженных дифференциальных уравнений гиперболического типа	244
<i>Ашрафова Е.Р.</i>	Решение задачи оптимального управления процессами при неточной информации о начальном состоянии	253
<i>Джумабаев Д.С., Бакирова Э.А.</i>	Алгоритмы нахождения решения нелинейной краевой задачи для интегро-дифференциального уравнения Фредгольма	262
<i>Жапбасбаев У.К., Махмотов Е.С., Бекибаев Т.Т., Рамазанова Г.И.</i>	Моделирование технологических режимов последовательной перекачки партий разных сортов нефтесмесей по магистральному нефтепроводу	270
<i>Калимолдаев М.Н., Абдилдаева А.А., Мамырбаев О.Ж., Дузбаев Т., Тойбаева Ш.</i>	Разработка информационной системы для электроэнергетических систем	279
<i>Кизбаев А.П., Абдибекова А.У., Хикметов А.К., Жакебаев Д.Б.</i>	Моделирование растекания нефтяного пятна на поверхности морской воды	292
<i>Кудайкулов А.К., Ташев А.А. Жумадилдаева А.К. Құрманбекқызы Н.</i>	Методы построения разрешающих систем уравнений нестационарной теплопроводности стержня ограниченной длины с учетом наличия локального теплового потока, теплообмена и боковой теплоизоляции	300



## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСТЕКЕНИЯ НЕФТЯНОГО ПЯТНА НА ПОВЕРХНОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ

Кизбаев А.П.<sup>1</sup>, Абдибекова А.У.<sup>1</sup>, Хикметов А.К.<sup>1</sup>, Жакебаев Д.Б.<sup>2</sup>  
e-mail: dauren.zhakebaev@kaznu.kz

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Национальная инженерная академия Республики Казахстан

*Abstract. The paper considers the development of methods and algorithms for direct numerical simulation of the oil spreading on the sea water surface. The mathematical model of the spreading the oil slick on the water surface is constructed, consisting of the continuity equations for each components, the continuity equation for the mixture, the momentum equation for the mixture. The numerical algorithm for solving the problem is developed. Computational experiments spreading of oil on the sea surface is carried out. The simulation results show only the influence of mass forces on the spreading the oil slick.*

*Keywords: the numerical modeling, oil spill, pollution, water surface.*

### 1 Введение

Разработка и освоение месторождений нефти на Каспийском шельфе представляют производство повышенного риска экологического загрязнения для Каспийского моря и окружающей среды прилегающих территорий. Любое высокотехнологическое производство не застраховано от аварий, и в случае чрезвычайных ситуаций, последствия могут вызвать необратимые процессы в окружающей среде [1-4].

Настоящую тревогу за состояние экологической обстановки вызывает программа транснациональных нефтедобывающих компаний по отношению к защите окружающей среды и морской акватории. В программе компаний говорится, что в случае разлива небольшого количества нефти в открытое море нефть испарится, а случае значительного разлива нефти в открытое море она будет подожена и случае катастрофы будет доставлено из Великобритании специальное оборудование для сбора нефти, и даже указано время доставки после аварий - 20-24 часа. По предварительным расчетам этого времени достаточно, чтобы при попутном ветре нефть оказалась в прибрежной зоне в камышовых зарослях, откуда собрать ее не возможно [5,6]. Такое беспечное отношение нефтедобывающих компаний к окружающей среде вызывает, по крайней мере, недоумение. Поэтому в настоящее время требуются новые подходы решения проблемы. Таким новым направлением, является разработка методов и алгоритмов прямого численного моделирования аэрогидродинамики проблем окружающей среды, когда с опережением можно в нестационарном режиме следить за развитием событий, реально происходящих в природе, поскольку исследования ведутся современными на сегодняшний день компьютерными технологиями и быстродействию современных компьютеров позволяет опережать реальный физический процесс. На данный момент времени опубликовано большое количество работ в области численного моделирования загрязнения и распространении нефтяного пятна, но все исследовательские работы ограничивались лишь моделированием на основе односкоростной математической модели.

В данной работе рассматривается математическое моделирование растекания нефтяного пятна на поверхности Каспийское моря при температуре воздуха 20<sup>0</sup> С, в состоянии покоя.



Для данной математической модели была рассмотрена двумерная трехкомпонентная модель на основе уравнений движения многофазной среды, с учетом скоростей компонентов «газ-нефть-вода». На рисунке 1 изображена многофазная среда, где зеленым цветом окрашена область потока воздуха над морем- «газ», синим цветом показана нефтяное пятно – «нефть» имеющая физические свойства вязкой жидкости, и область выделенная красным цветом является морской водой – «вода».

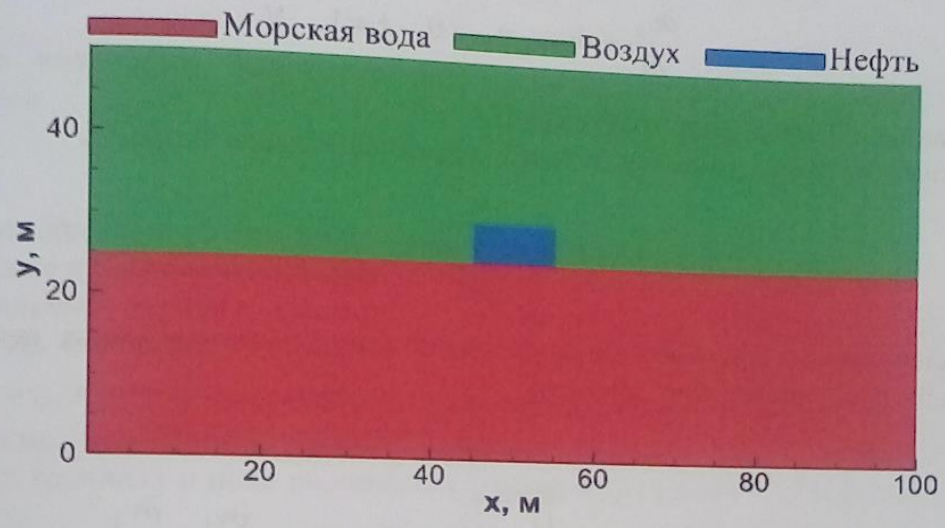


Рисунок 1 – Схематичная иллюстрация постановки задачи

**2 Математическая модель**

Численное моделирование процесса растекания нефтяного пятна основана на решении уравнения неразрывности для каждой компоненты, уравнения неразрывности для смеси, уравнения импульса для смеси:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \text{div } \rho_k v_k = 0, & k = 1 \dots N, & (1) \\ \text{div } v = 0, & & (2) \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (v \otimes v) = -\nabla p + \nabla \tau + f, & & (3) \end{cases}$$

где  $v_k$  – скорость движения компоненты;  $v$  – скорость смеси;  $p$  – давление;  $f = (0, -\rho g)$  – вектор внешних сил.  $g$  – ускорение свободного падения.

Истинная плотность компоненты  $\rho_k^0$  определяется как масса  $k$ -й компоненты в единице объема этой компоненты. В свою очередь, плотность (парциальная плотность) компоненты  $\rho_k$  есть масса компоненты в единице объема всей смеси. Объемная доля компоненты  $c_k$  определяется как отношение объема компоненты к объему смеси:

$$\sum_{k=1}^N c_k = 1, \tag{4}$$

$$\rho_k = c_k \rho_k^0, \quad k = 1 \dots N, \tag{5}$$

а плотность смеси  $\rho$  определяется по закону



$$\rho = \sum_{k=1}^N \rho_k \quad (6)$$

Используя соотношения (5), из первого уравнения (1) можно получить уравнения неразрывности в терминах объемной доли

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} + \operatorname{div} c_k v_k = 0, \quad k = 1 \dots N, \quad (7)$$

суммирование которых дает уравнение (2).

В качестве скорости смеси  $v$  берется среднеобъемная скорость

$$v = \sum_{k=1}^N c_k v_k \quad (8)$$

Тензор вязких напряжений  $\tau$ , которой для рассматриваемых неньютоновских жидкостей определяется выражением:

$$\tau = \mu_e D, \quad (9)$$

$$\mu_e = \mu_e(\dot{\gamma}), \quad \dot{\gamma} = \sqrt{\frac{1}{2} D \cdot D}, \quad D = D_{i,j} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \quad (10)$$

Неньютоновские жидкости:

$$\mu_e = (\tau_0 + k\dot{\gamma})\dot{\gamma}^{-1} \quad \text{– жидкость Бингама}$$

где  $\tau_0$  – предел текучести вязкопластической жидкости;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига;  $n, k$  – параметры реологических моделей.

Динамическая вязкость смеси  $\mu$  определяется по линейному закону

$$\mu = \sum_{k=1}^N c_k \mu_k \quad (11)$$

где  $\mu_k$  – динамическая вязкость  $k$ -ой компоненты.

Компоненты, такие как пузырьки газа или твердые частицы считаются дисперсными ( $k \in K_{dispersed}$ ), а остальные – несущими ( $k \in K_{carrier}$ ). Несущие фазы движутся с одинаковой скоростью  $v^{carrier}$ :

$$v_k = v^{carrier}, \quad k \in K_{carrier} \quad (12)$$

Отличие скоростей между дисперсными и несущими фазами определяются по закону Стокса:

$$v_k = v^{carrier} + u_k^{settling}, \quad k \in K_{carrier} \quad (13)$$



$$u_k^{settling} = \frac{(\rho_k^0 - \rho) \cdot d_k^2}{18\mu} g, \quad (14)$$

где  $d_k$  – диаметр частиц дисперсной фазы  $k$ .

Подстановка (12) и (13) в определение (8) дает

$$v = v^{carrier} + \sum_{k \in K_{susp}} c_k u_k^{settling}. \quad (15)$$

Отсюда получается выражение для скорости несущих фаз через среднюю скорость смеси

$$v^{carrier} = v - \sum_{k \in K_{susp}} c_k u_k^{settling}. \quad (16)$$

Скорости дисперсных фаз теперь вычисляются явно из (13).

Начальные и граничные условия

В начальный момент нижней половине области находится морская вода ( $c_{water} = 1$ ). На поверхности морской воды расположена столб нефти с размерами  $10 \times 5$  м ( $c_{oil} = 1$ ), в остальных точках области находится воздух ( $c_{air} = 1$ ).

Граничные условия предполагают обращение в ноль скорости на нижней границе, а в остальных границах в ноль обращается только нормальная к стенке составляющая скорости.

### 3 Численный алгоритм.

Для решения задачи используется схема расщепления по физическим параметрам, которая состоит из пяти этапов. Для уравнения импульса на первом этапе промежуточное поле скорости находится методом дробных шагов с использованием метода Адамса-Башфорта с четвертым порядком точности по пространству и вторым по времени. На втором этапе, по найденному промежуточному полю скоростей, находится поле давления с применением метода матричной прогонки [7]. На третьем этапе пересчитывается окончательное поле скоростей. На четвертом этапе, по найденным полям скоростей смеси вычисляем объемную долю компонентов с учетом массовых сил, в дальнейшем определяем парциальную плотность и динамическую вязкость каждой компоненты.

### 4 Результаты численного моделирования

Для расчетов были приняты следующие значения параметров:  $m_2$  – масса нефтяного пятна, был взят следующим значением:  $m_2 = 100000$  [кг],  $\rho_2$  – плотность рассматриваемой тингизской нефти, где  $\rho_2 = 789$  [кг/м<sup>3</sup>], следовательно объем можно вычислить по формуле:  $V_2 = \frac{m}{\rho} = 126.7$  [м<sup>3</sup>]. Расчетная область был взят размером  $N_1 \times N_2 = 200 \times 200$ , шаг по времени взят в безразмерном виде равным  $t = 0.005$  [с] и в  $T = 10$  [с], рассматриваемая плотность воздуха над морем был взят -  $\mu_1 = 1.7 \cdot 10^{-5}$  [Па·с], динамическая вязкость для воздуха  $\rho_1 = 1.27$  [кг/м<sup>3</sup>], динамическая вязкость для нефти -  $\mu_2 = 0.232 \cdot 10^{-3}$  [Па·с], плотность морской воды динамическая вязкость для нефти -  $\mu_2 = 0.232 \cdot 10^{-3}$  [Па·с], плотность морской воды



был принят для  $\rho_3 = 1020 \text{ [кг/м}^3\text{]}$ , и динамическая модель, соответственно будет  $\mu_3 = 9 \cdot 10^{-4} \text{ [Па}\cdot\text{с]}$ .

В результате численного моделирования были определены следующие значения: толщина образовавшейся нефтяной пленки, динамика растекания нефти в зависимости от времени, а также диаметр растекания нефтяного пятна.

На рисунках 2 - 5 показана динамика растекания нефтяного пятна и толщина нефтяной пленки в зависимости от времени без учета скорости ветра. Как видно из рисунка 2 в момент времени  $T = 2.5, \text{ [с]}$  область соприкосновения нефти с водной поверхностью имеет вид воронки, диаметр растекания составляет 20 м, а уже на момент времени  $T = 10.0, \text{ [с]}$  за счет массовых сил нефтяная пленка растекается по поверхности морской воды (Рисунок 5), а динамика его распространения будет зависеть от скорости водной поверхности, на которую будет влиять скорость воздушного потока. Плотность нефтяного пятна в зависимости от времени остается постоянной (рисунки 6- 9) перемешивания не происходит.

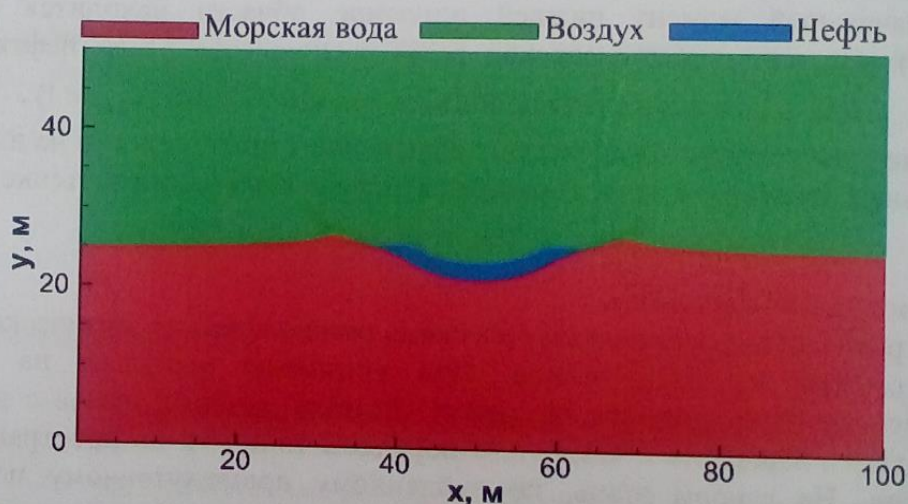


Рисунок 2 - Динамика растекания объемной доли компонентов смеси в момент времени  $T = 2.5, \text{ [с]}$

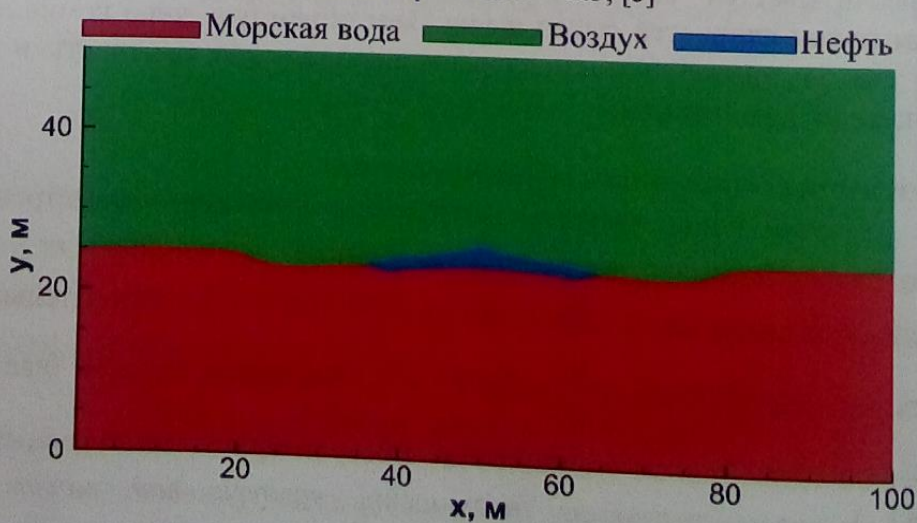


Рисунок 3 - Динамика растекания объемной доли компонентов смеси в момент времени  $T = 5.0, \text{ [с]}$



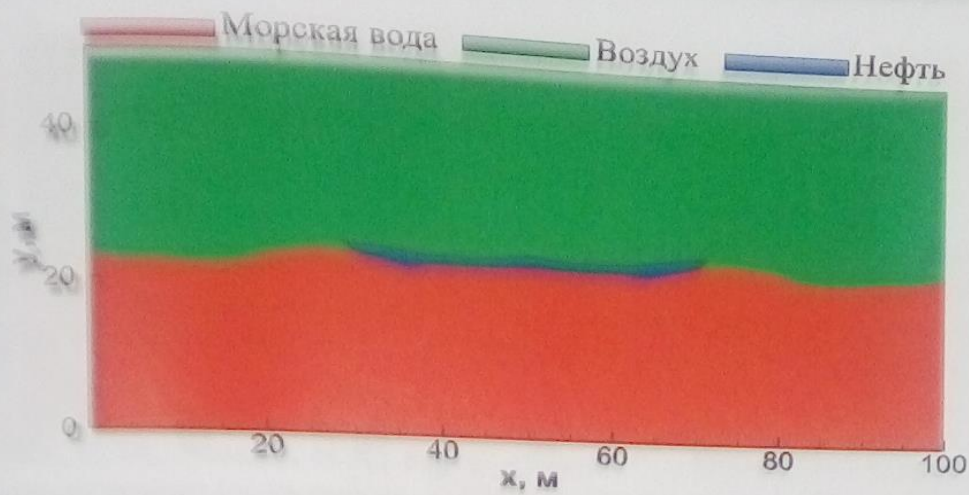


Рисунок 4 - Динамика растекания объемной доли компонентов смеси в момент времени  $T = 7.5, [c]$



Рисунок 5 - Динамика растекания объемной доли нефти в момент времени  $T = 10.0, [c]$

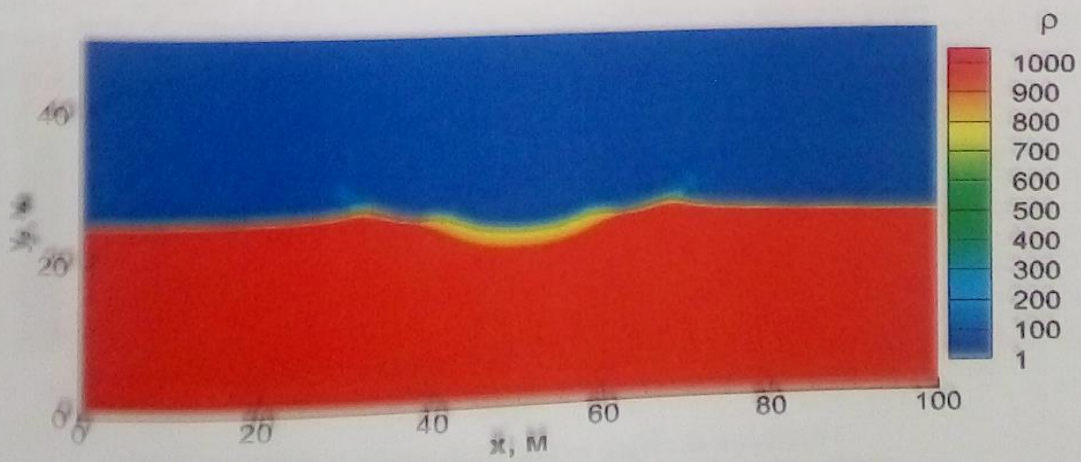


Рисунок 6 - Изменение плотности нефтяного пятна в момент времени  $T = 2.5, [c]$



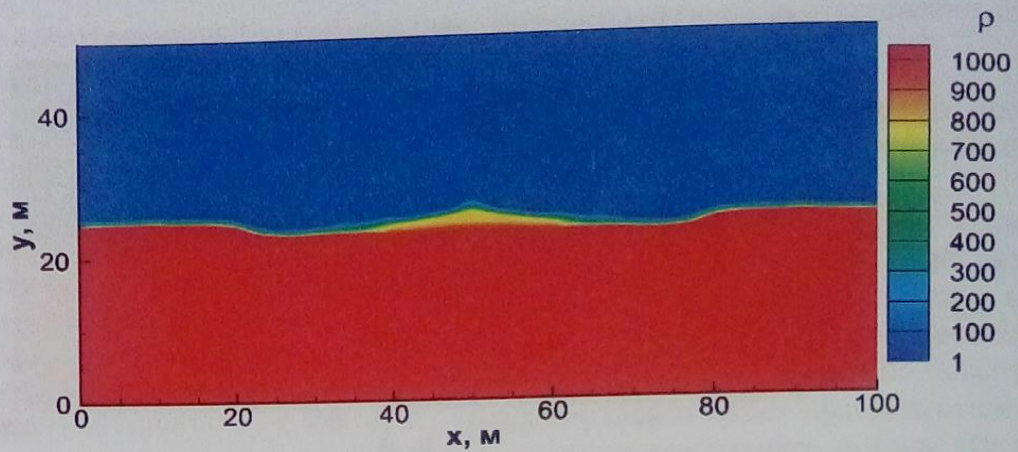


Рисунок 7 - Изменение плотности нефтяного пятна  
в момент времени  $T = 5.0, [c]$

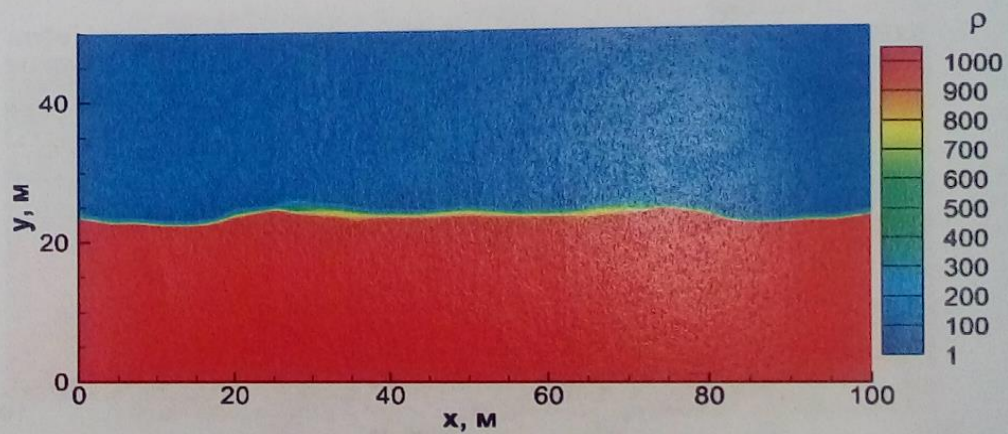


Рисунок 8 - Изменение плотности нефтяного пятна  
в момент времени  $T = 7.5, [c]$

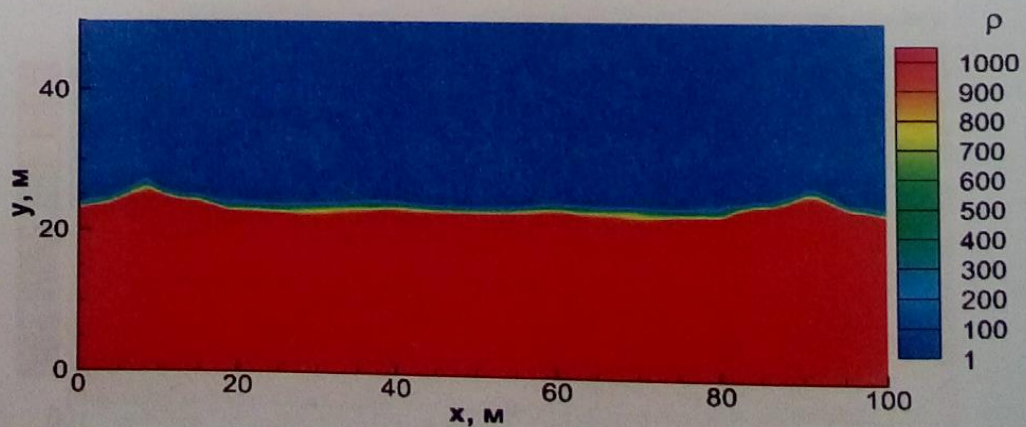


Рисунок 9- Изменение плотности нефтяного пятна  
в момент времени  $T = 10.0, [c]$

Таким образом, разработанная модель растекания нефтяного пятна по поверхности морской воды позволит рассчитывать площадь и определять траекторию миграций нефтяного пятна по акваторию Каспийского моря в зависимости от



метеоусловий. А также проводить численное моделирование разливов нефти в открытом 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/ГФ-4 «Разработка программного комплекса для оценки антропогенного загрязнения окружающей среды промышленных регионов Казахстана методами математического моделирования».

**Литература**

1. Качурин, Н.М., Левкин, Н.Д., Комисаров, М.С. // Геоэкологические проблемы угледобывающих регионов: монография. Тула: Изд. ТулГУ, 2011. – 560 с.
2. Киланова, Н.В., Климова, Е.Г., Зудин, А.Н. Оценка концентрации и эмиссии пассивного газа на основе системы усвоения данных для региона Сибири // Междунар. конф. по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды (Enviromis-2012): Избранные труды. – Иркутск, 2012. – С. 185-187.
3. Потапов, В.П., Гиниятуллина, О.Л., Андреева, Н.В. Информационно-математические модели загрязнений окружающей среды угледобывающих регионов // Инновационный конвент «Кузбасс: образование, наука, инновации». Т.2. - 2012. – С. 159-162.
4. Canepa, E., D'Alberti, F., D'Amati, F., Triacchini, G. The GIS-based SafeAirView software for the concentration assessment of radioactive pollutants after an accidental release // Science of the total environment, 2007. – Vol. 373, №1. – P. 32-42.
5. Интегрированное управление водными ресурсами: математические модели и информационные технологии / Препринт под ред. Л.А. Руховца. СПб ЭМИ РАН, 2007. – С 65.
6. Абдибеков, У.С., Хикметов, А.К., Жакебаев, Д.Б., Каруна, О.Л. Моделирование процесса переноса и испарения нефтяной пленки с поверхности моря // Нефть и газ, 2014. – Т.83, №5. – С. 23-27.
7. В.Т. Zhumagulov, D.B. Zhakebayev, A.U. Abdibekova. The decay of MHD turbulence depending on the conducting properties of environment // Magnetohydrodynamics Vol. 50 (2014), No. 2, pp. 121–138.