

551.46:551.51

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ НЕФТЯНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПО ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

АСАДОВ С.Б., РАГИМОВ Э.Р., ТАТАРАЕВ М.Т.

*Азербайджанское Национальное Аэрокосмическое Агентство НАН Азербайджана*

Изучение влияния состояния природной среды на аварийные разливы нефти с использованием математического моделирования является наиболее перспективным методом исследования. На основе двухмерной модели были рассчитаны поля течений и перенос нефти из источников аварийного разлива нефти в Каспийском море.

Среди глобальных проблем, имеющих общечеловеческую социальную значимость - проблемы экологии. Экологическая угроза океанам и морям поставила перед международным сообществом задачу принятия срочных мер по спасению среды обитания человечества. Беспрецедентны масштабы загрязнения океанов и морей, что приводит к серьезным негативным последствиям, сокращению воспроизводства биологических ресурсов и изменению климата. Наиболее типичными их загрязнениями являются непосредственные выбросы загрязняющих веществ в океаны и моря, при добыче и перевозках нефтепродуктов, авариях танкеров и др. В итоге загрязняется море, нарушается естественный круговорот веществ и энергии в природе.

Загрязнение оказывает негативное влияние на физические, химические и биологические процессы, протекающие в море и на границах между морем, атмосферой и сушей. Возрастающая загрязненность моря нефтью вызывает повышенный интерес не только к методам борьбы с причинами такого загрязнения, но и к методам расчета распространения в море попавшей в него по той или иной причине нефти.

Одним из возможных путей описания по разным причинам разливов нефти является использование физико-математических моделей, имитирующих поведение слоя разлитой на водной поверхности нефти, и позволяющих прогнозировать его перемещение под действием ветра и течений. Изучение влияния состояния природной среды на аварийные разливы нефти с использованием методов математического моделирования является наиболее перспективным методом исследования, поскольку позволяет учитывать как известные теоретические зависимости, так и доступные эмпирические данные.

В настоящей работе использованы осредненные по глубине уравнения мелкой воды; уравнение распространения нефти имеет вид [1-3]:

$$\begin{aligned}
 U_t + \left( \frac{U^2}{H} \right)_x + \left( \frac{UV}{H} \right)_y &= -gH\zeta_x - \frac{gH^2}{2\rho_0} \bar{\rho}_x - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial x} + fV + \\
 &+ K\Delta U + C_D \frac{\rho_a}{\rho_0} w_{(x)} |\bar{W}| - f_b \frac{U|\bar{V}|}{H^2} \\
 V_t + \left( \frac{UV}{H} \right)_x + \left( \frac{V^2}{H} \right)_y &= -gH\zeta_y - \frac{gH^2}{2\rho_0} \bar{\rho}_y - \frac{H}{\rho_0} \frac{\partial P_a}{\partial y} - fU + \\
 &+ K\Delta V + C_D \frac{\rho_a}{\rho_0} w_{(y)} |\bar{W}| - f_b \frac{V|\bar{V}|}{H^2}
 \end{aligned}$$

$$\zeta_t + U_x + V_y = \omega_s$$

$$(\bar{c}H)_t + (U\bar{c})_x + (V\bar{c})_y = K_c H \Delta \bar{c} - \lambda \bar{c} H + \bar{c}_s \omega_s - f_s$$

где  $\bar{v} = (u, v, w)$  - скорость воды,  $g$  - ускорение силы тяжести,  $\zeta(x, y, t)$  - уровень свободной поверхности,  $\rho(\bar{x}, t)$  - плотность воды,  $P_A$  - атмосферное давление,  $f = 2\omega \sin \varphi$  - параметр Кориолиса,  $\varphi$  - географическая широта,  $K$  и  $k$  - коэффициенты горизонтального и вертикального турбулентного обмена,  $\bar{\omega}_s$  - объем воды, поступающий в единичный объем за единицу времени из внутренних источников,  $U$  и  $V$  - полные потоки,  $\omega_s$  - объем воды, поступающий от внутренних источников на единицу поверхности в единицу времени,  $c(x, t)$  - концентрация растворенных примесей,  $c_s$  - концентрация примеси поступающей из источника,  $\lambda$  - коэффициент неконсервативности,  $k_c, K_c$  - коэффициенты вертикальной и горизонтальной диффузии примеси,  $f_s$  - изменения концентрации растворенных примесей. Координата  $z$  направлена вертикально вверх.

Модель реализована в криволинейных координатах и решается конечно-разностным методом. Граничные условия обычно имеют определяющее влияние на характер решения, а использование в качестве граничных узлов сетки, которые не совпадают с границей области, вносит ошибку именно в этих наиболее важных областях. Переход к гранично-зависимым криволинейным координатам дает возможность значительно увеличить точность решения.

В качестве одного из граничных условий на открытых границах задано

$$U_\tau = 0.$$

Второе граничное условие для первого типа открытых границ имеет вид:

$$U_n = F(t).$$

Для второго типа граничное условие

$$\zeta = \zeta(t).$$

Для твердых боковых границ условие пишется в следующем виде:

$$U_n = 0,$$

$$K \frac{\partial U_\tau}{\partial n} = -f_b \frac{U_\tau |\bar{\nabla}|}{H}$$

Для нефтяного загрязнения, на открытых границах, через которые вода поступает в расчетную область, задается временной ход концентрации примеси  $\bar{c} = \bar{c}(t)$ . На открытых границах, через которые вода вытекает из расчетной области, граничное условие для концентрации не ставится.

Аварийные разливы являются наиболее опасным, поскольку они непредсказуемы и носят локальный характер при большой мощности, и могут привести к нарушению экологического равновесия, при этом перенос нефти и нефтепродуктов в море играет большую роль.

Расчеты поля течений и переноса нефти выполнялись в двумерной постановке на сетке 143x301 узла с шагом по пространству 500 м (рисунок 1, а).

При расчете поля течений использовались данные срочных наблюдений за направлением и скоростью ветра с интервалом 6 часов по 15 станциям Каспийской акватории (рисунок 1, б).

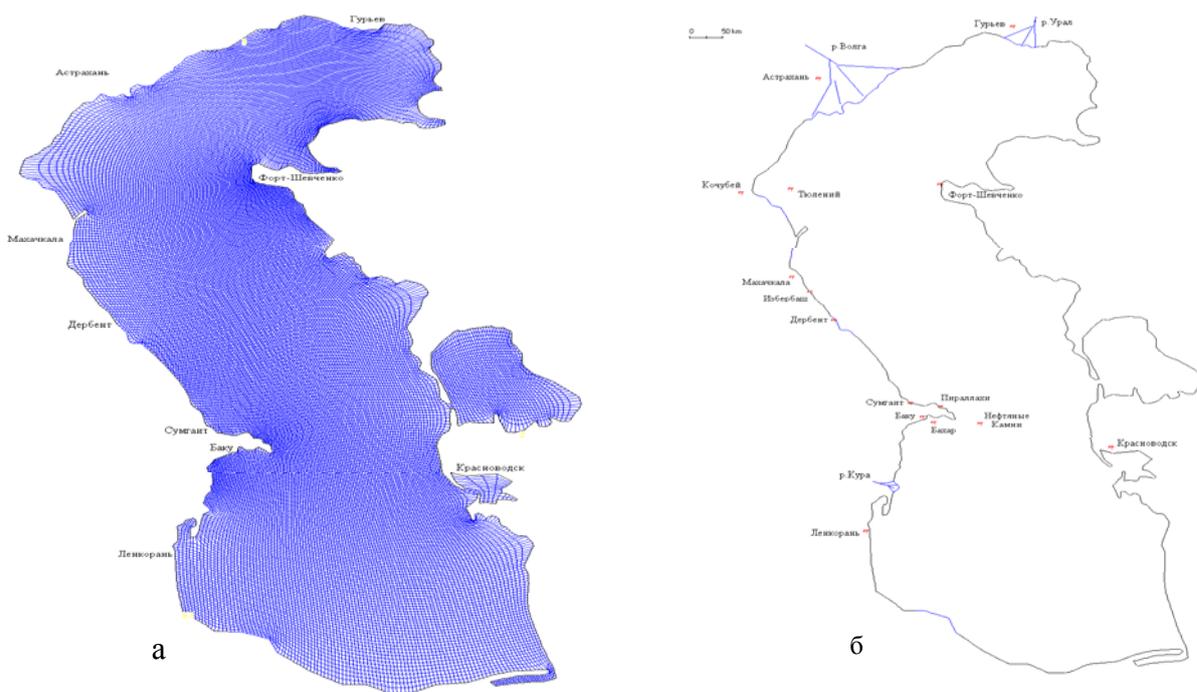


Рис.1. Карты Каспийского моря: а - криволинейная сетка; б – использованные гидрометеорологические станции

Задавались также расходы рек Волги, Урала и Куры. В расчетах шаг по времени равен 80 секунд. Расчеты выполнялись для марта и сентября месяцев.

Сначала рассмотрим результаты поля течений, полученные по гидродинамической модели. На рисунке 2 показаны осредненные по глубине скорости ветровых течений за март и за сентябрь. Следуя рисункам, отметим, что в западной части Южного Каспия в течение месяца сохраняется четко выраженная антициклоническая циркуляция со скоростью 1 - 4 см/с (рисунок 2 а). Течение со скоростью 4 - 10 см/с направлено вдоль западного берега к Апшеронскому полуострову. Существуют также мелкие антициклонические вихри в юго-западной части и циклонические циркуляции в юго-восточной части Южного Каспия. Вода движется вдоль восточного берега на север со скоростью 4 - 8 см/с, в Среднем Каспии скорость течений несколько увеличивается. Около Казахского залива течения сливаются с течениями с севера и направляются на запад и юго-запад со скоростью 1 - 4 см/с. Из них одна часть направляется вдоль западного берега на север, а другая часть, пересекая Апшеронский порог, направляется со скоростью 6 - 10 см/с на юг и юго-запад, где происходит конвергенция и перемешивание. Как отмечено, течения вдоль западного берега Среднего Каспия направлены на север со скоростью 9 - 16 см/с, около Дербента скорость дошла до 40 см/с. Можно сказать, что мелкие циклонические круговороты сохраняются в северо-западной части моря, существуют антициклонические круговороты в юго-западной и северо-восточной части, а также циклонический круговороты в восточной половине Среднего Каспия. В открытой части скорость течений не больше 4 см/с. Образуются циклоническая циркуляция в юго-западной части и антициклоническая циркуляция в северо-восточной части Северного Каспия. Максимальная скорость течений в Северном Каспии составляет 10 см/с.

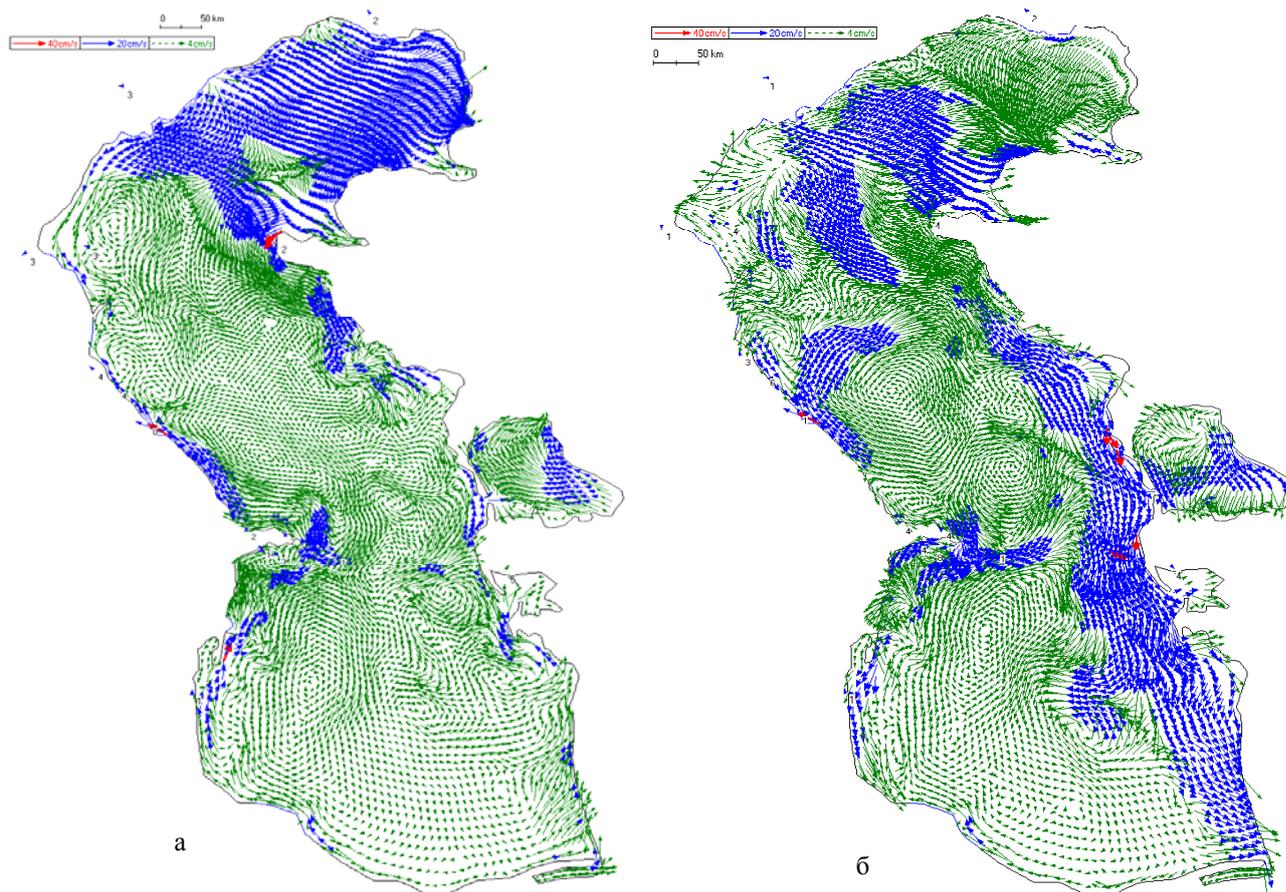


Рис.2. Осредненные по глубине скорости ветровых течений в Каспийском море (а - март, б - сентябрь)

Проанализируем результаты расчета поля течений, полученные осенью (рисунок 2 б). В сентябре месяце также существует антициклоническая циркуляция, и она охватывает западную половину Южного Каспия, скорость течений здесь не больше 3 см/с. Антициклоническая циркуляция состоит из двух круговоротов. При северо-восточном ветре у западного побережья Южного Каспия течения направлены от п-ова Апшерона к югу. При других направлениях ветра вода движется вдоль западного берега от взморья Куры на север. В южном направлении максимальные скорости течений не больше 20 см/с, а в обратном она несколько меньше. В северо-восточной части образуется циклонический круговорот. В этом месяце сохраняется южное направление течений на шельфовой зоне восточного берега в Среднем и Южном Каспии. Скорость течений достигла 20 см/с, а в некоторых местах она доходит до 25 - 35 см/с (около станции Бекдаша и п-ова Челекен). На юго-западной, северо-западной и в средней части Среднего Каспия образуются циклонические круговороты. В глубоководной части ближе к западу образуются антициклоническая (на северной периферии скорость 4 - 8 см/с) и в юго-восточной части – циклоническая циркуляции. В круговоротах скорость равно 4 см/с. Одна часть течений от устья Волги направлена вдоль западного берега на юг, а другая на северо-восток. От п-ова Аграханского до Дербента скорость течений увеличивается (5 - 10 см/с). На юго-восточной части Северного Каспия образуется циклонический круговорот. На основе полученных полей течений был рассчитан перенос нефти в двухмерной нестационарной модели от источников вероятного аварийного разлива нефти в Каспийском море. В расчетах задавались пять источников аварийного разлива нефти на поверхность моря (рисунок 3). Три из этих источников находились на Азербайджанской и по одному источнику на

Туркменской и Казахской акваториях. Концентрация нефти во всех источниках была задана равной единице.

Для расчета распространения нефти в Азербайджанской акватории выбраны источники разлива нефти - Нефтяные Камни, Бахар, Сумгаит. Условная мощность нефти в источниках была задана следующим образом:

Нефтяные Камни – 500 кг/с; Бахар, Сумгаит – 400 кг/с. Глубины моря в источниках равнялись 58, 17.4 и 8.4 м, соответственно.

В Казахской акватории моря, источник разлива нефти выбран около побережья Форт-Шевченко. Глубина моря в источнике 6.5 м, а мощность источника нефти выбран на 300 кг/с. В Туркменской акватории моря, около полуострова Челекен, выбран аварийный разлив нефти ближе к банке Челекен. Глубина моря в источнике равно 19.4 м, а мощность источника нефти выбран 300 кг/с.

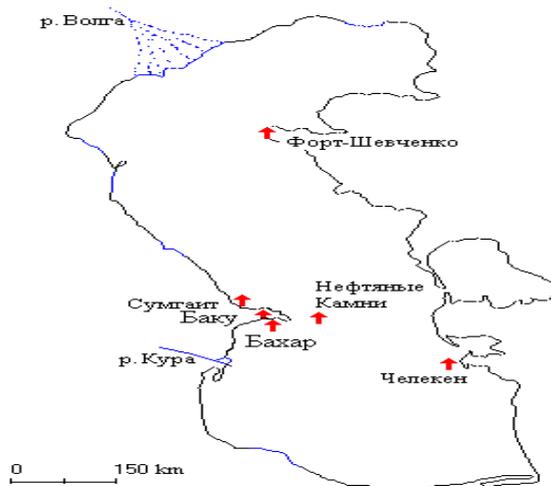


Рис.3. Источники вероятного аварийного разлива нефти расположенные в Каспийском море

Проанализируем результаты расчета распространения нефтяного загрязнения, полученные в марте месяце. Изолинии концентрации нефти от мгновенных источников представлены на рисунке 4. От источника Бахар нефтяное загрязнение направлено на юг, от Нефтяных Камней оно распространилось вокруг источника (рисунок 4 а, б.). От банка Челекен загрязнение направилось на юг (рисунок 4 с), а от Форт-Шевченка на юг и на север (рисунок 4 д, е). Из рисунков видно, что от источников нефтяное загрязнение быстро распространилась.

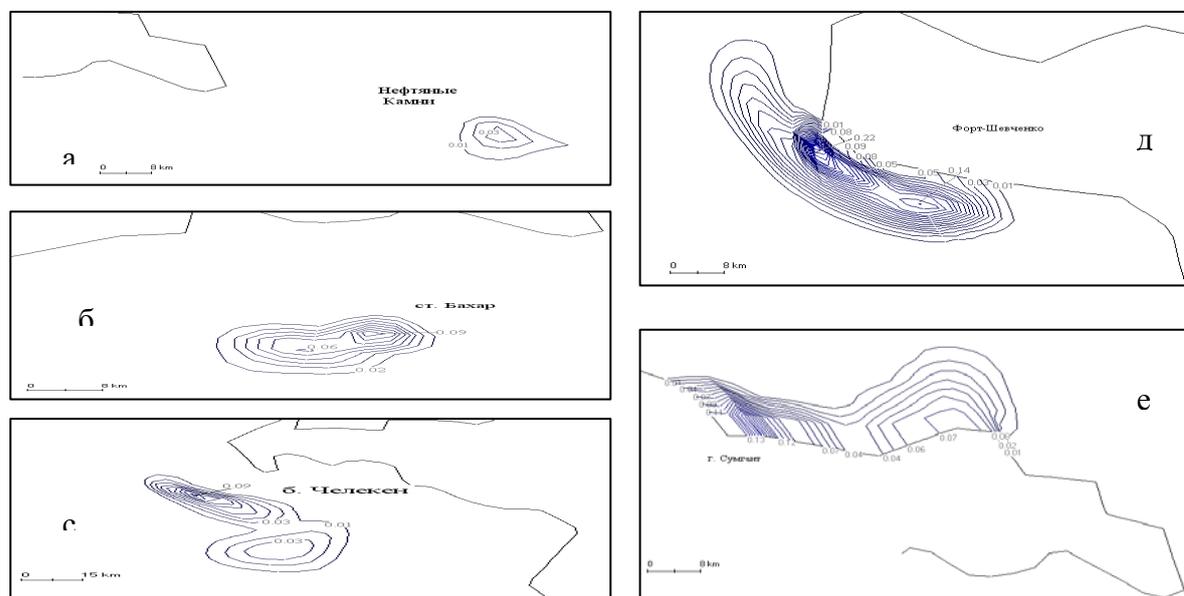


Рис.4. Изолинии концентраций нефти в Каспийском море в марте: Нефтяные Камни (а), Бахар (б), б.Челекен (с) Форт-Шевченко (д), Сумгаит (е).

В очаге источников концентрация нефти осталась равной следующим значениям: Форт-Шевченко  $0.22 \text{ кг/м}^3$ ; Сумгаит –  $0.13 \text{ кг/м}^3$ ; Нефтяные Камни –  $0.03 \text{ кг/м}^3$ ; Бахар и б.Челекен –  $0.09 \text{ кг/м}^3$ .

Расчеты проводились также осенью, в сентябре месяце. Изолинии концентрации нефти от мгновенных источников показаны на рисунке 5. Распространение нефтяного загрязнения от источников Форт-Шевченко и б.Челекен схожи с распространением, полученным в расчетах в марте месяце. Загрязнение от источника Сумгаит распространилось до северо-восточной части Апшеронского полуострова, а от Бахар оно направилось к берегу на юг. Концентрации нефти в течение расчета в центре источников составили в Форт-Шевченко  $0.38 \text{ кг/м}^3$ , в Сумгаите  $0.16 \text{ кг/м}^3$ , в Бахар  $0.05$ , в б. Челекен  $0.08 \text{ кг/м}^3$ . Нефтяное загрязнение от источников Форт-Шевченко и б.Челекен распространяется на север, а от источников Нефтяные Камни и Бахар оно распространяется в северном и южном направлении соответственно.

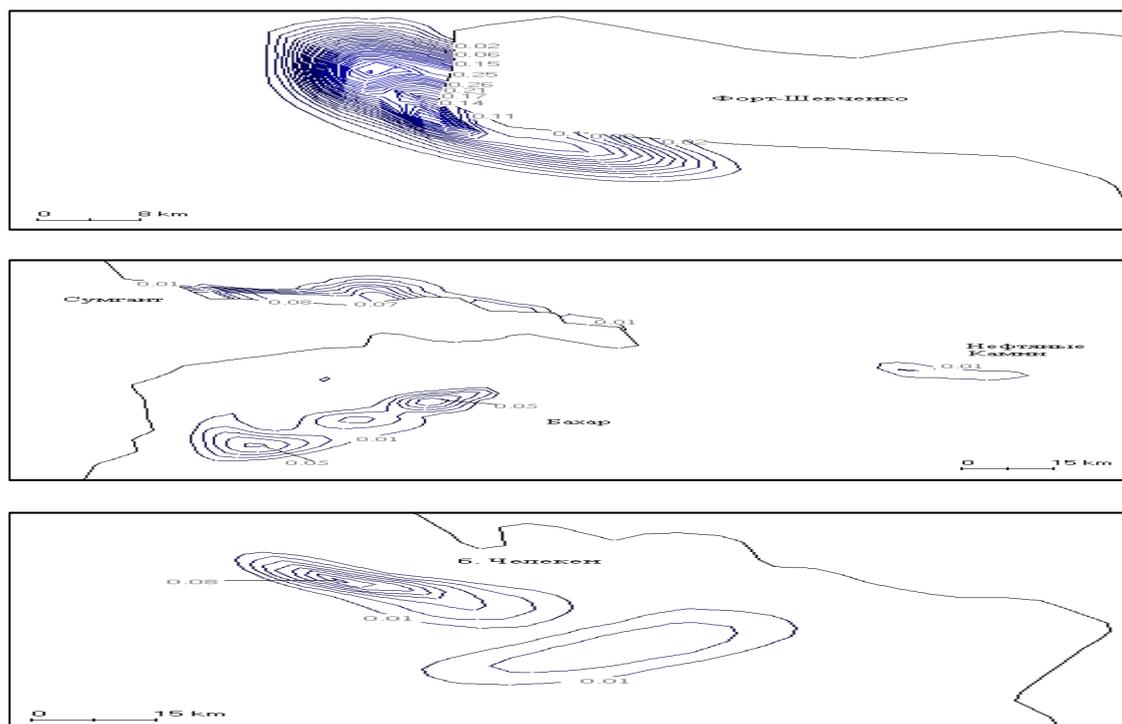


Рис.5. Изолинии концентраций нефти в Каспийском море в марте: Форт-Шевченко; Нефтяные Камни, Бахар, Сумгаит и б.Челекен (сверху вниз).

Концентрация нефти в источниках Форт-Шевченко меняются от  $0.22$  до  $0.01 \text{ кг/м}^3$ , в Сумгаите от  $0.33$  до  $0.01 \text{ кг/м}^3$ , в Нефтяных Камней от  $0.06$  до  $0.01 \text{ кг/м}^3$ , в Бахар от  $0.17$  до  $0.01 \text{ кг/м}^3$  и в банке Челекен от  $0.2$  до  $0.01 \text{ кг/м}^3$ .

Необходимо отметить, что ветер значительно влияет на распространение нефти на поверхности моря. Судя по проведенному расчету, распространение нефтяных разливов от источников в основном ограничивается участками непосредственного поступления нефтяных углеводородов. Полученные результаты могут быть использованы в прогнозировании и в разработке мероприятий по защите Каспийского моря от загрязнения при аварийных разливах нефти.

1. Вольцингер Н.Е., Клеванный К.А. Полунежный метод решения уравнений мелкой воды в криволинейных координатах // Колебания и волны в механике сплошной среды. Межведомственный сб-к научных трудов. Горький: Изд-во Горьковского политехнического ин-та, 1989. – С. 96-102.
2. Вольцингер Н.Е., Клеванный К.А., Пелиновский Е.Н. Длинноволновая динамика прибрежной зоны. Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 76 с.

3. *Asadov S.B., Klevannyi K.A.* Расчет циркуляции вод в Каспийском море. Материалы итоговой сессии Ученого совета 30 – 31 января 2002.– СПб.: Изд. РГГМУ, 2002  
С. 145 – 146.

### **XƏZƏR DƏNİZİNDƏ NEFT ÇİRKƏNDİRİCİLƏRİNİN İKİÖLÇÜLÜ MODELİ İLƏ YAYILMASI**

**ƏSƏDOV S.B., RƏHİMOV E.R. TATARAYEV M.T.**

Ətraf mühitin qəza nəticəsində dənizə tökülmüş neftə təsirini riyazi modelləşmə metodları vasitəsilə öyrənilməsi daha perspektiv tədqiqat metodlarından hesab olunur. İkiölçülü model əsasında Xəzər dənizinin axın sahəsi və neftin qəza nəticəsində dənizə tökülmüş mənbələrindən daşınması hesablanmışdır.

### **DISTRIBUTION OF OIL POLLUTION ON TWO-DIMENSIONAL MODEL OF THE CASPIAN SEA**

**ASADOV S.B., RAGIMOV E.R., TATARAYEV M.T.**

The study of influence of a condition of natural environment on of accident oil with use by a method of mathematical modeling is the most perspective of research. On a basis of two-dimensional model the currents fields and oil transfer from oil outflow sources in the Caspian Sea were calculated.