

ЭКОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕНОСА ШЛАМА И БУРОВОГО РАСТВОРА ПРИ СБРОСЕ НА ПОВЕРХНОСТЬ МОРЯ

Р.М.Мамедов¹, А.Г.Ханларов²

*1 - Институт географии НАНА
AZ 1143, Баку, просп. Г.Джавида, 31
E-mail: ramiz.mamedov@geo.ab.az*

2 - Бакинский филиал ООО ЛУКОЙЛ Волгоград НИПИ Морнефть

Разработана комплексная модель и проведено численное моделирование распространения выбуренной породы и бурового раствора для восьми вариантов сброса. По результатам моделирования в целом выяснено, что более тяжелые частицы бурового шлама быстро осаждаются, незначительно рассеиваясь на дне непосредственно над точкой сброса. Буровой шлам и раствор при моделировании разбивались на 6 фракций, отражающих плотностной состав смеси. Исследовано поведение каждой фракции, ее текущее положение в морской воде и интенсивность оседания на дно. Нерастворимые в воде барит и гель выведены в отдельные фракции для анализа их поведения в каждом случае.

ВВЕДЕНИЕ

Моделирование процессов диффузии и оседания выбуренного материала и бурового раствора в море имеет ряд сложностей, поскольку в состав этого материала входят различные фракции частиц с определенным разбросом их по размерам, весу и плотности. Для адекватного учета мультidisперсности материала в процессах его переноса требуется создание высокоразрешающих моделей переноса осаждающихся частиц в совокупности с гидродинамическими моделями, которые могли бы описывать сложную циркуляцию моря и движение частиц выбуренного материала.

При сбросе выбуренного материала на поверхность моря выявляются дополнительные особенности в распределении выбуренного материала в толще моря, связанные с тем, что в процессе оседания вещество проходит зоны с разными распределениями скорости и интенсивности турбулентной диффузии, их необходимо точно рассчитывать. При этом большую трудность в моделировании течений составляет правильный прогноз процессов адвективно-турбулентного переноса. Следует также отметить, что динамика приповерхностного и придонного слоя моря отличается своей сложностью и изменчивостью. Эти процессы можно прогнозировать только с по-

мощью высокого класса моделей термогидродинамики, поэтому их выбору было уделено особое внимание.

Следует особо выделить так называемый придонный турбулентный пограничный слой, который образуется в результате взаимодействия придонного потока воды и шероховатости дна. Правильный учет динамики этого слоя определяет механизм и структуру области выбуренного материала.

Неадекватный учет динамики верхнего и придонного слоев, подмена его прямого моделирования введением полуэмпирических формул типа закона «3/4» или «Ричардсона–Обухова» в лучшем случае дают очень грубую картину зоны осадения выбуренного материала, в большинстве случаев – просто неверное представление.

На рис.1 схематично показан пример распределения поля концентрации оседающего бурового раствора, выпускаемого с поверхности моря (Mineral management..., 2002). В силу, по-видимому, слишком упрощенного подхода к решению такой задачи, этот рисунок даже схематично ошибочно отражает распределение поля концентрации бурового раствора в придонном слое. Пунктирными линиями показано, как должен распределяться материал в придонном слое в случае, если

профиль течения соответствует тому, который представлен на рис.1. Следует отметить, что поле скорости течения определяется многими факторами, поэтому информацию о скорости течения можно получить только при модельных расчетах.

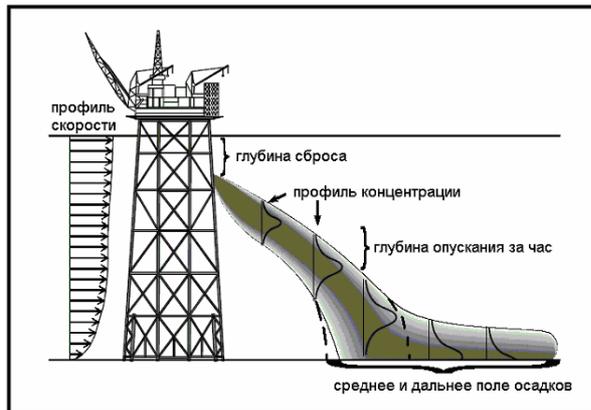


Рис. 1. Схематичное представление профиля скорости течения и осадения бурового раствора, сбрасываемого в верхнем слое (Отчет MMS-02-008)

При описании совместного распространения выбуренного материала и бурового раствора будет выделяться несколько зон осадения, соответствующих основным компонентам материала, отличающихся по плотности и размерам частиц. В основном, это три основные зоны осадения:

ближняя зона, в которой осаждаются крупные, тяжелые фракции;

средняя зона, в которой осаждаются легкие компоненты выбуренного материала;

дальняя зона, в которой осаждаются легкие фракции бурового раствора.

В ближней и средней зонах количество осажденного материала велико, а при моделировании его переноса необходима информация об устройстве оборудования, характере бурения, литологическом разрезе пород в области бурения, характеристиках бурового материала и т.п.

В дальней зоне концентрации выбуренного материала значительно уменьшаются как за счет диффузии вещества, так и в результате осадения тяжелых частиц на ранних стадиях процесса переноса. Обычно при моделировании предполагается, что перенос каждой из фракций осуществляется независимо от остальных, причем скорости горизонтального переноса всех фракций определяются лишь величиной скоро-

сти течения и интенсивностью турбулентности в рассматриваемом слое, т.е. такими процессами, как коагуляция, горизонтальный гидравлический эффект течения на частицы и трение, можно пренебречь, поскольку процесс осадения тяжелых частиц довольно скоротечный. При моделировании, однако, учитывается, что скорости осадения для различных частиц различны, поскольку они, как было указано выше, отличаются плотностями. В дальней зоне часто применяется адвективно-диффузионное приближение, связанное с пренебрежением динамическими и инерционными эффектами относительного движения загрязняющих компонентов среды, а также со взаимодействием этих компонентов. Для мелких частиц бурового раствора существенным является процесс флокуляции, который существенно замедляет процесс оседания легких мелких фракций. Об этом будет подробно описано ниже.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задачи были поставлены согласно (ОВОС при разведочном..., 2003). Был проведен ряд имитаций сброса шлама и бурового раствора в точке предполагаемого бурения скважины. Для двух случаев (100% и 50% сброса) комплексным методом моделирования течений и переноса частиц в море были проведены прогностические расчеты процесса диффузии и оседания шлама и бурового раствора в море. Предполагаемый график бурения скважины соответствует реальной ситуации.

В каждом из случаев рассматривается 4 подслучая для разных интервалов бурения под колонну: 16, 13 $\frac{3}{8}$, 9 $\frac{7}{8}$ и 7 дюймов, т.е. всего 8 численных экспериментов.

Условия бурения и объемы выбуренного материала. По условиям нашей задачи рассматриваются два варианта (100%-ный и 50%-ный) выбросов выбуренной породы и сопутствующего бурового раствора на поверхность моря. Ниже, в таблице 1, приводятся условия сброса материала.

Продолжительность строительства поисково-разведочной скважины (включая ее ликвидацию) – 188 дней. Расчеты проводились для среднелиматических условий в зимний период до снижения концентрации в морской воде сбрасываемой выбуренной породы, содержащей буровой раствор ниже значения ПДК, который для бурового раствора в морской воде составляет величину порядка 0.25г/л.

Таблица 1

График сброса выбуренной буровой породы, содержащей буровой шлам

Интервал бурения под колонну, дюйм	Начало бурения интервала, дней	100% выброс			50% выброс		
		Объем сбрасываемой выбуренной породы, содержащей буровой раствор, куб.м	Продолжительность сброса, сут.	Скорость сброса, куб.м в час.	Объем сбрасываемой выбуренной породы, содержащей буровой раствор, куб.м	Продолжительность сброса, сут.	Скорость сброса, куб.м в час.
16"	26	191	1,9	4,19	96	1,9	2,11
13 ³ / ₈ "	45	65	0,8	3,39	33	0,8	1,72
9 ¹ / ₈ "	62	126	5,0	1,05	63	5,0	0,53
7"	103	44	10,4	0,18	22	10,4	0,09

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫБУРЕННОГО ШЛАМА

В процессе буровых работ на платформе образуются отработанные буровые растворы (ОБР), повторное использование которых в циркуляционной системе уже невозможно, а также буровой шлам (БШ), который представляет собой раздробленную породу со средней плотностью $1,9 \text{ т/м}^3$, слагающую геологический разрез скважины.

Буровой шлам. Гранулометрический, минералогический и химический состав шлама может сильно изменяться в зависимости от типа горных работ, от режима бурения, породоразрушающего инструмента, рецептуры бурового раствора, а также технологии и оборудования для отделения и очистки шлама. Различные системы для сепарации твердой фазы из буровых растворов обычно позволяют отделять частицы взвеси размером более 10-70 мкм. По сравнению с твердой фазой буровых растворов в шламах, как правило, присутствуют более грубые и более крупные частицы минералов и горных пород с размерами иногда до нескольких сантиметров.

Буровые растворы на водной основе. Буровые растворы этого типа являются в настоящее время наиболее предпочтительными в экологическом плане. Их используют сейчас повсеместно при выполнении буровых работ на морском шельфе. Такого рода растворы готовятся на морской или пресной воде (до 90 %) и представляют собой густую коллоидальную суспензию специальной глины обыч-

но монтмориллонитового типа (бентонит, до 10 %) с добавкой барита (до 20 %), каустической соды и других солей и реагентов. Ассортимент современных химических средств, используемых для приготовления буровых растворов, насчитывает сотни наименований, однако в практике буровых работ обычно используют не более 10-20 реагентов.

Параметры и компонентный состав шлама и бурового раствора нами взяты из (ОВОС при разведочном..., 2003). Этот состав обычно меняется в зависимости от глубины бурения. Это также учитывается при моделировании.

Скорость оседания выбуренного материала. Эта характеристика является основной при моделировании процесса осадкообразования бурового шлама в районе бурения скважины. В зависимости от плотности и размеров частиц шлама наряду с горизонтальным переносом частиц идет опускание частиц. Для частиц с размерами более 1 мм скорость оседания довольно значительна, более 10 см/с. Это значит, что такие частицы в процессе бурения и их сброса будут распределяться вокруг скважины и только мелкие частицы будут переноситься течением на достаточно удаленное расстояние.

Аналитический график, представленный на рис.2, дает непрерывную зависимость скорости оседания от размера частицы. Однако в процессе бурения образуются частицы с определенными преимущественными размерами в зависимости от геологической

структуры пород и методов бурения. Так, для Каспийского моря характерен свой состав размеров частиц выбуренной породы. Распределение размеров частиц, их процентное соотношение и соответствующая скорость оседания представлены в таблице 2.

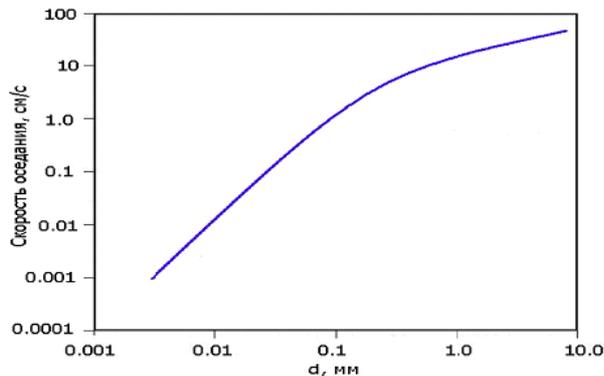


Рис. 2. Зависимость скорости Стоксового оседания частиц от их размера

Из табл. 2 видно, что основную долю в шламе занимают частицы крупных размеров, у которых скорость оседания значительна. Мелкая фракция представлена частицами размерами порядка 70 микрон. Эти частицы появляются в основном в результате бурения глинистых пород. В процентном отношении такие частицы составляют порядка 10% от общей массы.

Эти характеристики частиц использовались при моделировании осадкообразования в районе бурения.

Таблица 2

Характеристики частиц шлама

Номинальный размер частиц (микрон)	Удельный вес (г/см ³)	Процент от общей массы	Скорость оседания (м/с)
12500	2.5	85	0.72
9625	2.5	1.25	0.63
6750	2.5	1.25	0.52
3875	2.5	1.25	0.41
1000	2.5	1.25	0.23
74	3.0	10	0.003

Размеры частиц в буровых растворах.

Состав фракций бурового раствора дан в табл. 2. На рис.3 показано распределение размеров частиц в буровом растворе. Основные размеры лежат в области 2-6 мкм. Барит представлен

более крупными частицами с размерами от 20 до 40 мкм. Следует заметить, что само количество барита, как следует из табл. 2, меняется в зависимости от глубины прохождения.

Как известно, скорость оседания частиц вещества в воде зависит от размеров и разности плотностей воды и частицы и определяется законом, приведенным на рис.3. Зная эти параметры, можно оценить скорости оседания частиц. Например, для частицы диаметром 0.005 см и плотностью 4.5 г/см³ скорость оседания будет порядка 0.5 см/с. Это соответствует закону Стокса. Однако в природе все намного сложнее. Лабораторные опыты показывают, что глинистые вещества образуют агрегаты, скорость которых в 1000 раз меньше, чем по закону Стокса. Это явление учитывалось при моделировании распространения компонентов выбуренного материала и бурового раствора.

ИНИЦИАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ

Для моделирования течений и переноса частиц выбуренного материала и бурового раствора применялась комплексная модель, состоящая из гидродинамического блока на основе Принстонской Модели циркуляции моря (Mellor, Yamada, 1982; Proctor et al., 1994), адаптированной для Каспийского моря, и блока переноса на основе метода Монте-Карло. Детальное описание основ этого подхода можно найти в работах авторов (Коротенко, Мамедов, 2001; Мамедов, 1999; Korotenko, Mamedov, 2004; Mamedov et al., 2002).

Основные параметры применяемой модели. Для расчетов использовались две модели: крупномасштабная, охватывающая все Каспийское море, и мелкомасштабная, охватывающая локальный район вокруг скважины. В модели циркуляции размеры сетки составляли по горизонтали для крупной сетки 6.4 × 9.7 км. Для расчетов на мелкой сетке пространственный шаг брался 500x500 м. По вертикали сетка была неравномерной для лучшего разрешения приповерхностного и придонного погранслоев. Шаг по времени был равен 1800 с для крупной сетки и 18 с для мелкой. В модели переноса шаги по времени составляли 360с.

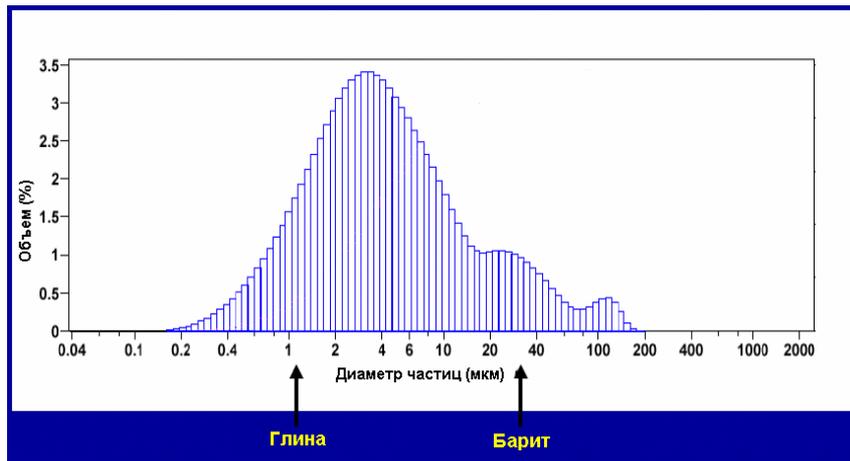


Рис. 3. Распределение размеров частиц в буровом растворе

Модельное представление смеси бурового шлама и бурового раствора. Буровой шлам и буровой раствор представляют собой смеси различных по физико-химическим свойствам веществ, и поэтому моделирование бурового раствора и шлама требует аккуратного представления их основных компонентов. В применяемой модели шлам и раствор представлялись в виде трех фракций каждый. Такое представление делалось на основе данных о составе породы и раствора, сбрасываемых при бурении. При этом выделялись следующие фракции: 1 – тяжелые компоненты шлама; 2 – средние компоненты шлама; 3 – легкие компоненты шлама; 4 – легкие растворимые компоненты бурового раствора; 5 –

барит и 6 – гель. В соответствии с процентным составом каждый из компонентов менялся в зависимости от глубины бурения. В частности, учитывалось увеличение процентного содержания барита в растворе с глубиной. На основе удельной плотности и размера частиц (см. рис. 3) каждого из компонентов рассчитывалась скорость оседания. При этом размеры частиц в пределах их среднего размера задавались случайным разбросом по нормальному закону. Этим добивалось более натуральное представление частиц в смеси. На рис.4. представлено изображение графического вывода текущего положения частиц смеси при вычислении.

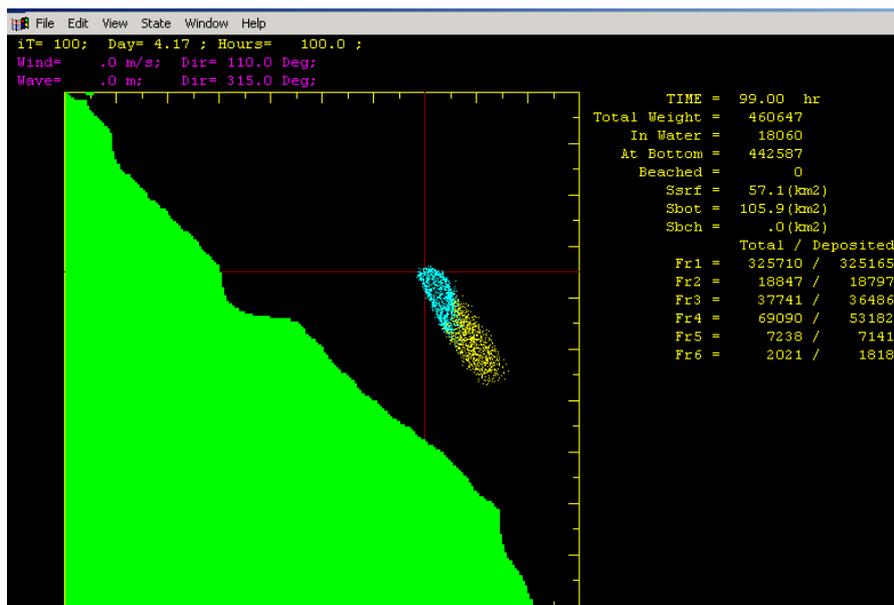


Рис. 4. Текущая интегральная позиция частиц в эксперименте 100%-16''

Голубым цветом выводятся частицы, осевшие на дно, желтым - те, которые находятся в воде. На экран также выводится информация о текущем соотношении частиц в воде и в осадке, а также площадь, занимаемая частицами на поверхности, дне и берегу.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование течений. Основу моделирования процессов переноса различных веществ в море составляет аккуратное моделирование поля скорости течений. Несмотря на то, что в случае сброса продуктов бурения следует ожидать быстрого осаждения основной тяжелой массы выбуренного материала, течение играет большую роль в его дисперсии в толще моря, в особенности легких фракций выбуренного материала и бурового раствора. В формировании осадконакопления материала и его распределении на дне большую роль будет играть также придонное течение. Поэтому точности расчета скорости течения в данной работе уделялось особое внимание. На рис.5. показана скорость течения на горизонте 335м в районе Дербентской впадины, рассчитанная с помощью мелко-масштабной модели для локального полигона в районе указанной впадины.

Видно, что в районе точки бурения на поверхности моря среднеклиматическое течение направлено на юго-восток вдоль берега, а на глубине течения имеют вид компенсационных противотечений, причем перенос на глубине идет в противоположном направлении, т.е. на север, северо-запад. Максимальных значений (около 0.1 м/с) это противотечение достигает на западном свале глубин. Более детальный анализ течений дан в работах Мамедова и Коротенко (Коротенко, Мамедов, 2001; Мамедов, 1999).

Результаты численного моделирования переноса выбуренного материала и сопутствующего бурового раствора. Расчеты проводились для 8-ми возможных случаев сброса бурового материала. При этом в каждом конкретном случае расчеты проводились до полного оседания бурового шлама и раствора на дно моря. Время расчета менялось от случая к случаю, что будет показано на примерах. По мере счета распределение частиц и соотношение числа (массы) осевших частиц к

находящимся в воде контролировались на дисплее (рис.4). Результаты расчета (координаты частиц) затем представлялись в виде количества массы каждого из компонентов в таблицах и графиках. Ниже дан детальный анализ случая 100 %-ного выброса при диаметре колонны 16 дюймов.

Следует отметить, что при заданных мощностях выброса выбуренного материала и бурового раствора их концентрация даже в расчетной ячейке, где помещен источник, ниже ПДК, взятого из расчета 0.25 г/л. Поэтому этот критерий при расчетах не использовался, а моделирование, как было сказано выше, проводилось до полного оседания материала на дно.

Вариант 100%-16''. Согласно этому варианту, как и другим, обсуждаемым ниже, мощность источника и процентное соотношение фракций выбиралось по табл. 1. Как видно из рис. 4, генеральное направление распространения струи шлам-буровой раствор – юговосточное. При этом тяжелые фракции быстро оседают и образуют практически под точкой выброса шлама значительный слой. Легкие фракции до оседания успевают пройти определенное расстояние по течению. Турбулентная диффузия расширяет зону осаднения. Схематично процесс осадкообразования представлен на рис. 6.

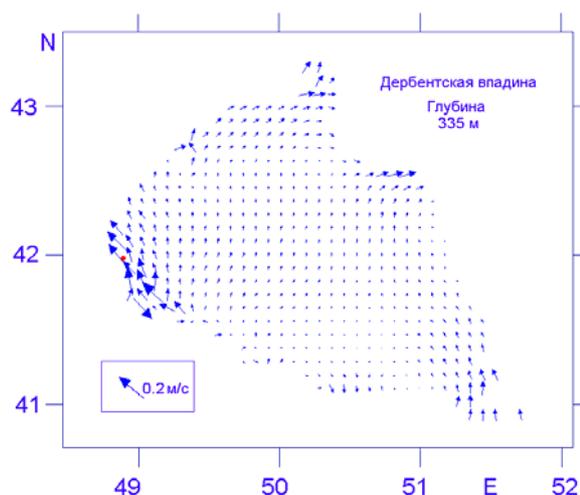


Рис. 5. Среднеклиматическое течение в Дербентской впадине на глубине 335 метров

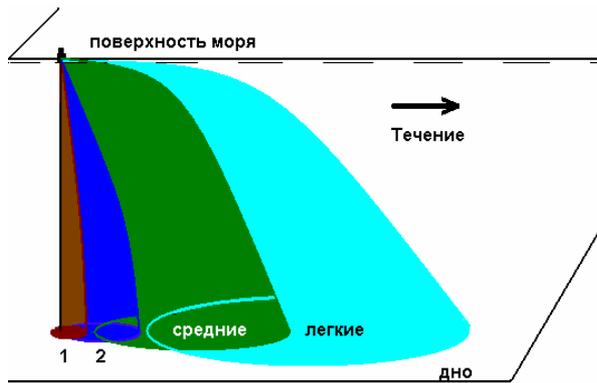


Рис. 6. Процесс образования зоны оседания шлама и бурового раствора

Рассмотрим процесс образования осадка в реальном сложном поле скорости течения. На рис.7 дано расчетное интегральное (т.е. частицы просуммированы по широте) распределение концентрации частиц шлама и бурового раствора как функции по глубине и долготе, $C(x,z)$. Видна зона накопления тяжелых фракций и сформированная вертикальная структура поля концентрации, которая также свидетельствует о сепарации компонентов с различной плотностью и размерами.

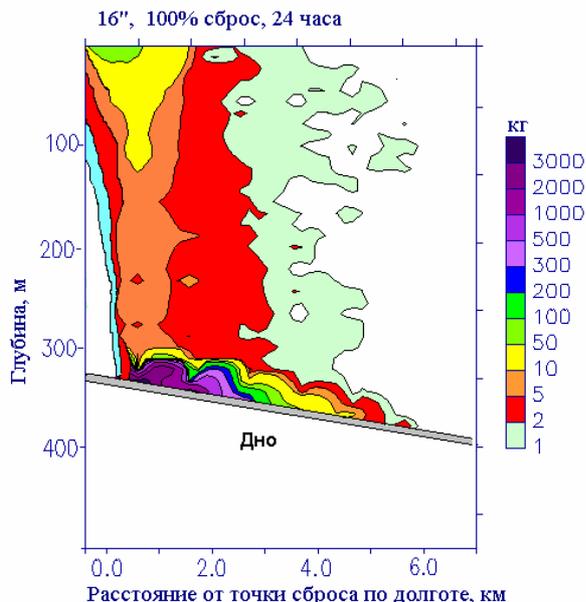


Рис. 7. Двумерное поле концентрации шлама и бурового раствора

Чтобы представить, как масса вещества распределяется в пространстве, в модели предусмотрен вариант просмотра трехмерного распределения частиц. На рис.8 представлены трехмерные распределения струи частиц шлама и бурового раствора. Разным цветом даны частицы в разных интервалах глубин. Видно, что в течение работы источника (19 дней) происходит мощное осадко-накопление шлама на дне практически под точкой сброса. Для 36 часов, однако, уже заметно смещение легких частиц на юго-восток. Заметим, что на рисунке даны расстояния от источника, т.е. источник находится в точке (0,0).

Тяжелые фракции шлама быстро оседают (их скорость порядка 0.7 м/с – см. табл.2), поэтому сразу после прекращения сброса в воде остаются лишь легкие и средние по весу фракции, которые сносятся течением. Это видно на последовательных фазах для 72, 120 и 190 часов. Для этих времен видно также, что частицы оседают на наклонное дно: глубина увеличивается вдоль направления струи. Видно, что длина области осадкообразования к 190-ти часам более 20 км. Интересно также изменение площади, занимаемой шламом и буровым раствором. На рис. 9 показаны площадь дна под осадком, а также площадь поверхности, занятая шламом и буровым раствором.

Рис.9 показывает, что площадь дна под осадком растет со временем до насыщения (~150 км²). При этом на этой кривой заметны участки наибольшего прироста площади, соответствующие времени оседания разных фракций. В отличие от площади осадка на дне, площадь на поверхности растет во время работы источника и падает до нуля после окончания его работы. Детальное изменение количества каждой фракции для рассматриваемого случая показано на рис.10.

ВЫВОДЫ

Разработана комплексная модель и проведено численное моделирование распространения выбуренной породы и бурового раствора для восьми вариантов сброса. Как показало моделирование, более тяжелые частицы буро-

вого шлама быстро осаждались, незначительно рассеиваясь на дне непосредственно над точкой сброса. Более легкие фракции относились среднеклиматическим течением на юго-восток и оседали на дне, образуя зону, вытянутую на юго-восток.

Буровой шлам и раствор при моделировании разбивались на 6 фракций, отражающих плотностной состав смеси. Исследовано

поведение каждой фракции, ее текущее положение в морской воде и интенсивность оседания на дно. Учитывалось также изменение процентного состава смеси бурового раствора и шлама в зависимости от глубины бурения. Нерастворимые в воде баррит и гель выведены в отдельные фракции для анализа их поведения в каждом случае.

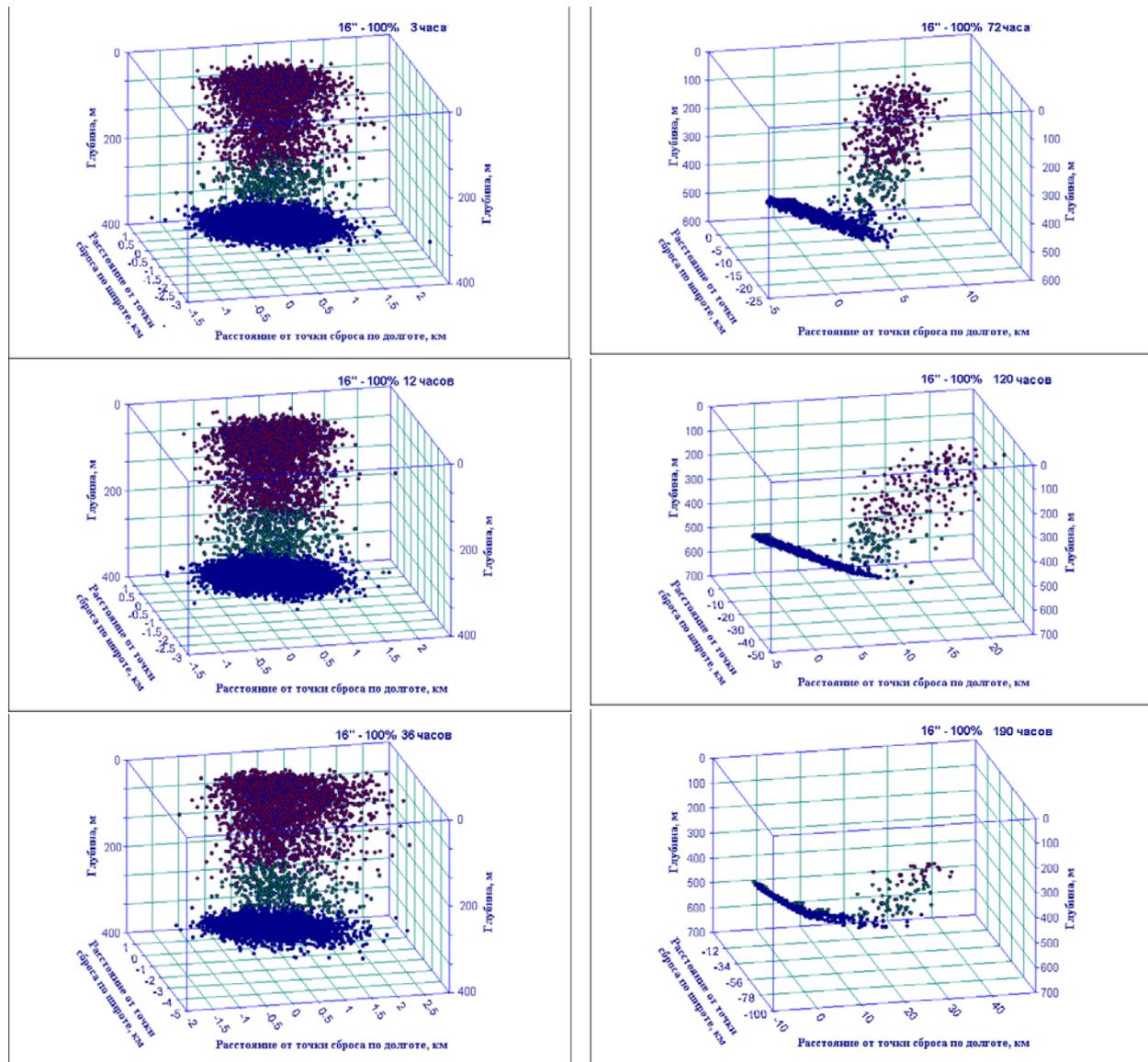


Рис. 8. Трехмерное поле концентрации шлама и бурового раствора. Для удобства разным цветом даны частицы в разных интервалах глубин: красный – 0-200м; зеленый – 200-300м; синий – 300-400м

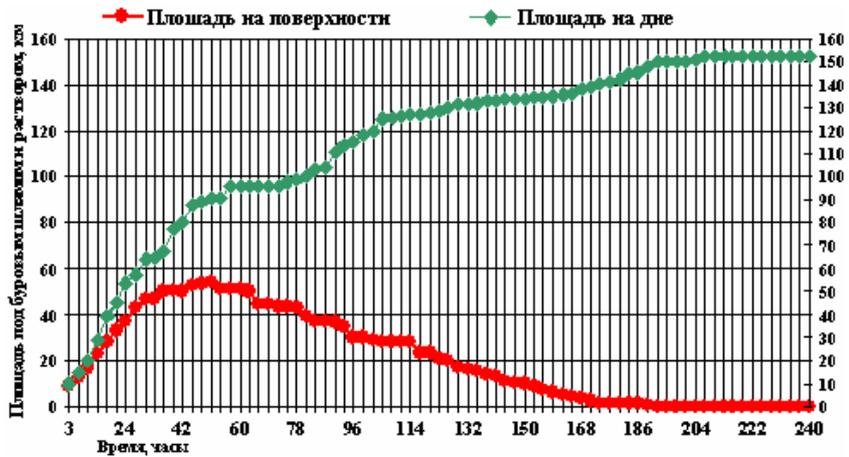


Рис. 9. Изменение во времени площади под буровым шламом и раствором; сброс - 100%, колонна - 16''

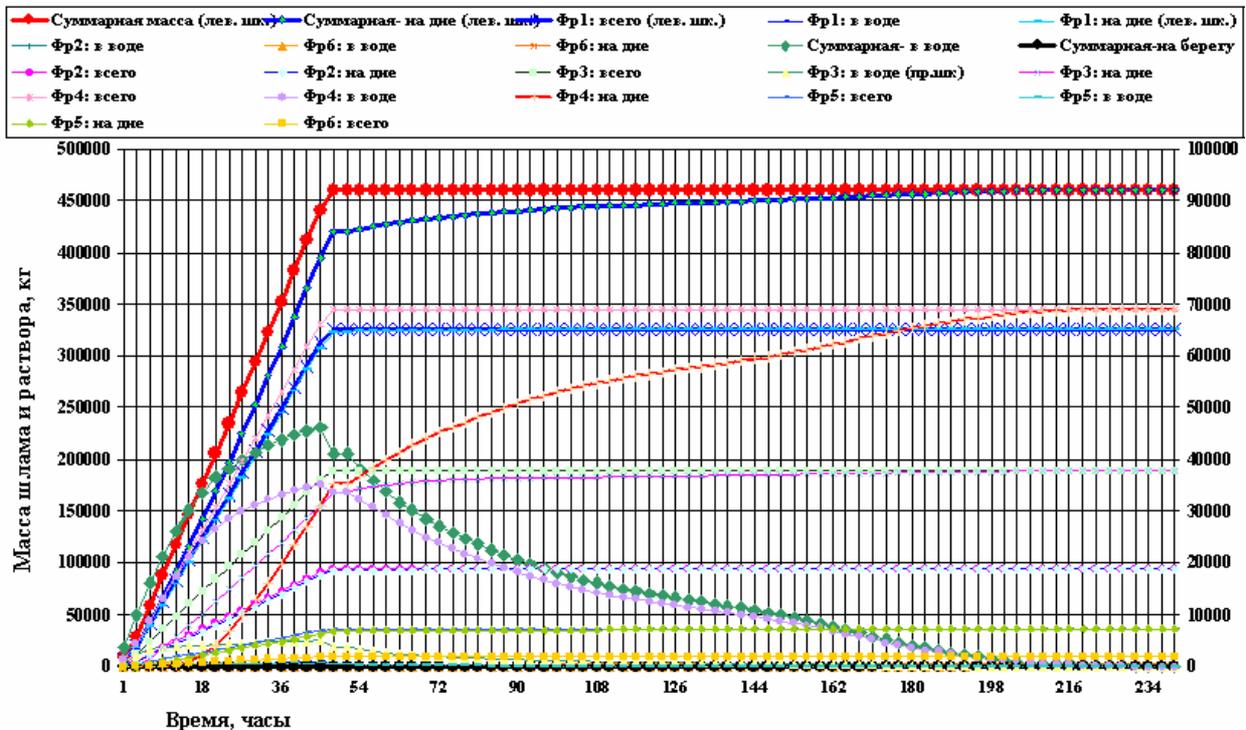


Рис. 10. Изменение во времени составляющих бурового шлама и бурового раствора (сброс- 100%, 16'')

Расчеты проводились максимально для 15 дней. За это время частицы всех фракций для всех восьми вариантов успевали осесть на дно. При заданных мощностях выброса выбуренного материала и бурового раствора их концентрация даже в расчетной ячейке, где помещен источник, ниже ПДК, взятого из расчета 0.25 г/л. Поэтому этот критерий при расчетах не использовался, а расчет прово-

дился до полного оседания всех фракций. Наиболее длительный процесс оседания был для варианта (100%-7''). Несмотря на относительно небольшое количество сбрасываемого материала, т.к. процесс сбрасывания продолжался 10.4 суток, полностью все фракции осели на дно за 14.8 часа.

Как показали расчеты, максимальная площадь загрязнения дна порядка 150 км², что

при максимальном количестве сброса (вариант $100\% \cdot 9^{7/8}$) дает толщину слоя порядка 1 мм. Однако это средняя оценка для равномерно распределенного по площади материала. Следует ожидать более толстый слой у вертикали под источником, где оседает основная масса шлама. Здесь по оценкам может образоваться слой до 1 см и более.

ЛИТЕРАТУРА

- КОРОТЕНКО, К.А., МАМЕДОВ, Р.М. 2001. Моделирование распространения нефтяных пятен в прибрежной зоне Каспийского моря. *Океанология*, 41, 1, 42 – 52.
- МАМЕДОВ, Р.М. 1999. Моделирование процессов распространения аварийных разливов нефти в Каспийском море. *Известия НАН Азербайджана, Науки о Земле*, 3, 42-51.
- ОВОС при разведочном бурении на перспективном Азербайджанском блоке В-222 в Каспийском море. 2003. Баку, 437.
- DEARDORFF, J.W., WILLIS, G.E. 1975. A parametrization of diffusion in the mixed layer. *J. Applied. Meteorology*, 14, 8, 1451-1458.
- KOROTENKO, K.A., MAMEDOV, R.M. 2004. Particle tracking method in the approach for prediction of oil slick transport in the sea: modelling oil pollution resulting from river input. *J. Marine Systems*, 48, 159-170.
- MAMEDOV, R.M., KOROTENKO, K.A., MOOERS, C.N.K. 2002. Prediction of the transport and dispersal of oil in the South Caspian Sea resulting from blowouts. *J., Environ. Fluid Mechanics*, 1, 383-414.
- MELLOR, G.L., YAMADA, T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.* 20, 851-875.
- Mineral Management Service. 2002. Final EIR, USA.
- PROCTOR, R., FLATHER, R.A., ELLIOT A.J. 1994. Modelling tides and surface drift in the Arabian Gulf-application to the Gulf Spill. *Cont. Shelf Res.*, 14(5), 531-545.