

© Г.И.Джалалов, Г.М.Эфендиев, Т.Н.Маммадов, 2010

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕДИМЕНТАЦИИ ЧАСТИЦ БУРОВОГО ШЛАМА В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Г.И.Джалалов, Г.М.Эфендиев, Т.Н.Маммадов

*Институт геологии НАН Азербайджана
AZ1143, Баку, просп. Г.Джавида, 29А*

Путём аналитических и экспериментальных исследований оседания частиц бурового шлама в водной среде впервые получены закономерности изменения массы, диаметра и скорости оседания частиц во времени. Показано, что масса и диаметр частиц буровых отходов экспоненциально снижаются во времени при их оседании, приближаясь к установившемуся для данной среды значению, которое остаётся постоянным при дальнейшем увеличении времени наблюдений. При этом разработана схема расчётов скорости оседания частиц буровых отходов.

Введение. Известно (Инструкция по охране..., 1994; Патин, 2001; Балаба и др., 2001), что на изменение физико-химических свойств частиц выбуренной породы существенное влияние оказывает дисперсионная среда бурового раствора. При этом минералогический состав бурового шлама определяется литологическим составом разбуриваемых пород и может существенно изменяться по мере углубления скважин. Химический состав бурового шлама зависит как от его минерального состава, так и от свойств бурового раствора. Гранулометрический состав шлама определяется типом и диаметром породоразрушающего инструмента, механическими свойствами породы, режимом бурения, свойствами бурового раствора и эффективностью ее очистки.

Буровой раствор и вообще природные и промышленные воды содержат какое-то количество взвешенной фракции; в такой среде, как обычно, происходит процесс седиментации, который ведет к отстаиванию, то есть отделению твердой фракции от жидкой, при этом очищается водная среда, с одной стороны, и загрязняется дно, с другой. При оседании глинистых частиц происходит также помутнение водной среды и длительное его сохранение. При этом частицы, движущиеся с разными скоростями и на небольшом расстоянии друг от друга, могут взаимодействовать между собой. Всё это играет большую роль в осадкообразовании бурового шлама вблизи скважины и оказывает существенное влияние на скорость оседания частиц, которая, являясь одной из важных характеристик,

привлекает внимание большого количества исследователей. Наличие в составе бурового шлама частиц различных размеров, массы и плотности обуславливает сложность оценки их скоростей оседания.

Постановка задачи. В ряде работ отмечается, что используемая в настоящее время теория седиментации основана на формуле Стокса, которая справедлива для одиночной частицы. Реальные же скорости оседания могут значительно отличаться от скорости, рассчитанной по формуле Стокса, особенно для густой полидисперсной среды.

В связи с этим в литературе дается различная интерпретация происходящим при этом явлениям. Так, согласно анализу, выполненному в работе (Балаба и др., 2001), установившаяся скорость осаждения частиц песка размером 0,84 мм составляет 0,128 м/с, а частиц размером 2 мм – 0,274 м/с. Для частиц, диаметр которых больше 0,06 мм, скорость оседания не подчиняется закону Стокса (Уолкер, 1983). В данном случае, как отмечает автор, большие частицы быстро опускались на дно со скоростью примерно 1 см/с, меньшие опускались гораздо дольше. Для их полного оседания потребовалось более 10 минут.

В одной из работ (Мамедов, Ханларов, 2006) приводятся результаты численного моделирования распределения выбуренных частиц. Авторами установлено, что более тяжёлые частицы бурового шлама быстро осаждаются, незначительно рассеиваясь на дне непосредственно над точкой сброса. Там же со ссылкой на результаты лабораторных иссле-

дований отмечается, что глинистые вещества образуют агрегаты, скорость которых в 1000 раз меньше, чем скорость, определённая по закону Стокса.

Моделирование процессов оседания частиц выбуренного материала в реальных морских условиях имеет ряд сложностей, поскольку в состав этого материала входят различные фракции частиц с определенным разбросом их по размерам, весу и плотности. В связи с этим для адекватного учета процессов, протекающих в реальных условиях, в работах (Мамедов, Ханларов, 2006; Korotenko, Mamedov, 2004; Mamedov et al., 2002) приводятся результаты построения комплексной модели и численного моделирования распространения выбуренной породы и бурового раствора для восьми вариантов сброса буровых отходов с учётом сложных процессов, в частности циркуляции моря и движения частиц выбуренного материала.

При сбросе выбуренного материала на поверхность моря выявляются дополнительные особенности в его распределении в толще моря, связанные с тем, что в процессе оседания вещество проходит зоны с разными распределениями скорости и интенсивности турбулентной диффузии, что требует более сложных расчётов.

При этом количественное описание динамики процессов, происходящих в водных экосистемах, связано с трудностями методического, информационного и алгоритмического характера. Имеющиеся в настоящее время проблемы вызваны несовершенством средств и методов экологических исследований в буровых процессах, трудностями постановки и реализации экспериментальных исследований, математического моделирования процессов, происходящих в морских условиях при сбросе буровых отходов.

Отмеченное выше свидетельствует о серьёзных трудностях исследования процессов оседания частиц в реальных морских условиях. Несмотря на это, всё же имеются проблемы, связанные с неоднозначностью оценок и отсутствием общего мнения в закономерностях оседания частиц даже в условиях, отличных от реальных. Данное обстоятельство существенно затрудняет оценку экологического состояния морской среды в районе ведения

буровых работ, в то же время обуславливает важность и актуальность проведения отмеченных выше комплексных исследований.

Исходя из вышеизложенного, в настоящей статье приводятся результаты анализа процесса оседания частиц бурового шлама, закономерности изменения во времени массы, диаметра и скорости оседания частиц. Отобранные пробы буровых отходов были подвергнуты анализу также с точки зрения распределения в них частиц различных размеров.

Результаты исследований. С целью изучения закономерностей изменения скорости оседания и проведения сравнительного анализа нами осуществлены наблюдения за влиянием фракционного состава бурового шлама, отобранного из скважин, пробуренных как на Сахалине, так и месторождениях Азербайджана, на скорость осаждения в водной среде.

Предварительно были проведены микроскопические исследования образцов пород, представленных в основном глинами с различными включениями. Отработанный шлам был подвергнут анализу с оценкой химического состава, который позволил установить в его составе наличие различных химических соединений и элементов, таких как окиси натрия, магния, алюминия, кремния, фосфора, калия, кальция, бария, железа и др. Кроме того, определено содержание также и микроэлементов, результаты ещё раз подтверждают отрицательное влияние на окружающую среду отходов бурения скважины.

Шлам, отобранный из скважин месторождения «Гюнешли», представлен относительно более крупными глинистыми частицами, которые в водной среде набухают и диспергируются. Диспергирование ещё более усиливается при повторном гидротранспорте частиц через скважину, что приводит к снижению скорости оседания в водной среде. В данном случае также большую роль играет время проведения наблюдений.

Поэтому при изучении скорости оседания глинистых частиц необходимо учесть временной фактор, что и было сделано нами.

Для того, чтобы прийти к какому-либо выводу, необходимы постановка и проведение более широких исследований, которые позволили бы проследить за изменением скорости оседания в начальный момент, ус-

тановить время начала изменения диаметров частиц, а также изменение диаметров и массы оседающих частиц во времени, обосновать соответствующие закономерности в рамках накопленных к настоящему времени теоретических и экспериментальных исследований. С учётом этого, нами проведены исследования, исходя из теоретических предпосылок, опубликованных в литературе для случая постоянного диаметра оседающих частиц (www.mgru.ru/download.php?id=2453).

В отмеченной работе рассматривается свободное падение шарика в жидкости. При этом на шарик действуют три силы: сила тяжести mg , сила Архимеда $F_{арх}$ и сила внутреннего трения $F_{тр}$. Предполагается, что шарик достаточно мал, так что при движении он не возмущает жидкость и не оставляет за собой никаких завихрений.

На основе отмеченных условий в этой же работе для определения скорости оседания получено следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dv}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_{ж}}{\rho}\right)g - \frac{18\eta}{\rho D^2}v, \quad (1)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность частиц; ρ – плотность среды; η – вязкость среды; D – диаметр частиц; v – скорость оседания.

Данное уравнение легко решается, в результате получается, что скорость шарика растёт по экспоненциальному закону, приближаясь к установившейся скорости.

Следует отметить, что рассматриваемый нами процесс отличается тем, что в нашем случае оседание происходит в водной среде, причём согласно (Патин, 2001) и нашим предварительным наблюдениям в процессе оседания размеры частиц вследствие диспергирования уменьшаются. Поэтому в вышеприведённом уравнении в отличие от рассмотренного случая диаметр частиц следует принимать не постоянным, а как функцию времени.

С целью установления вида зависимости диаметра частиц от времени нами проводились исследования оседания частиц бурового шлама в водной среде, в процессе которых через определённое время измерялись масса и диаметр осевших частиц. Диаметры оседавших через фиксированное время частиц устанавливались с помощью их распределения с

использованием прибора «Master Sizer 2000» фирмы Малверн, принцип действия которого основан на измерении распределения интенсивности рассеянного лазерного луча, пропущенного через отобранные пробы. В результате наблюдений получены распределения частиц, которые показывают концентрацию фракций различных размеров. А значение размера частиц определялось как средневзвешенное по их процентному содержанию. Плотность и функция распределения для одного случая в качестве примера показаны на рисунке 1. Далее проводились наблюдения за процессом оседания частиц в водной среде. При этом исследовалось изменение размеров, массы и скорости оседания частиц буровых отходов во времени.

Как показали наблюдения, диаметр, масса и скорость оседания частиц, увеличиваясь в начале опыта, достигают за относительно короткое время наибольшего значения, затем снижаются, подчиняясь экспоненциальному закону. В начале опыта было зафиксировано время появления первого осадка, затем наблюдения проводились через относительно большие интервалы времени. Опыты проводились до тех пор, пока не закончится процесс оседания, т.е. пока последние 2-3 наблюдения не дадут близких, почти одинаковых, результатов. По результатам наблюдений построен график изменения диаметра частиц во времени, приведённый на рисунке 2. Как видно из графика, с истечением времени диаметр частиц снижается, приближаясь к установившемуся значению.

Результаты наблюдений за изменением диаметра и массы частиц, а также скорости их оседания во времени приведены в таблице 1. Там же приведены и расчётные значения диаметров частиц и скоростей их оседания. Как видно из таблицы, вначале в течение 4с наблюдается рост значений скорости оседания, после чего скорость снижается.

Экспериментальные данные подвергнуты статистической обработке, в результате которой получена эмпирическая зависимость, выражающая связь диаметра частиц и времени:

$$D(t) = (d_0 - d_{уст})\exp(-kt) + d_{уст}, \quad (2)$$

где d_0 и $d_{уст}$ – начальный и установившийся диаметры частиц соответственно.

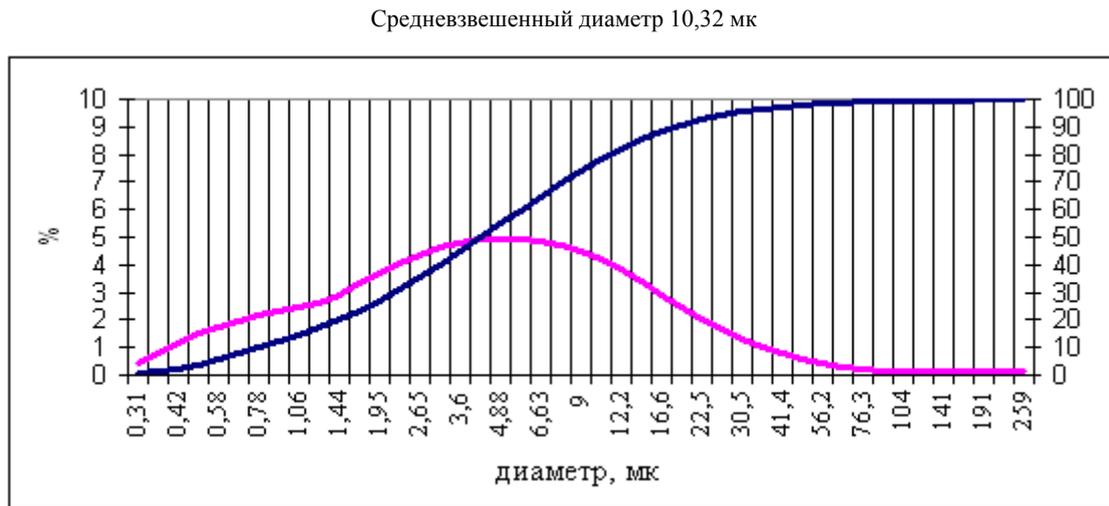


Рис. 1. Плотность и функция распределения частиц с различным средневзвешенным диаметром

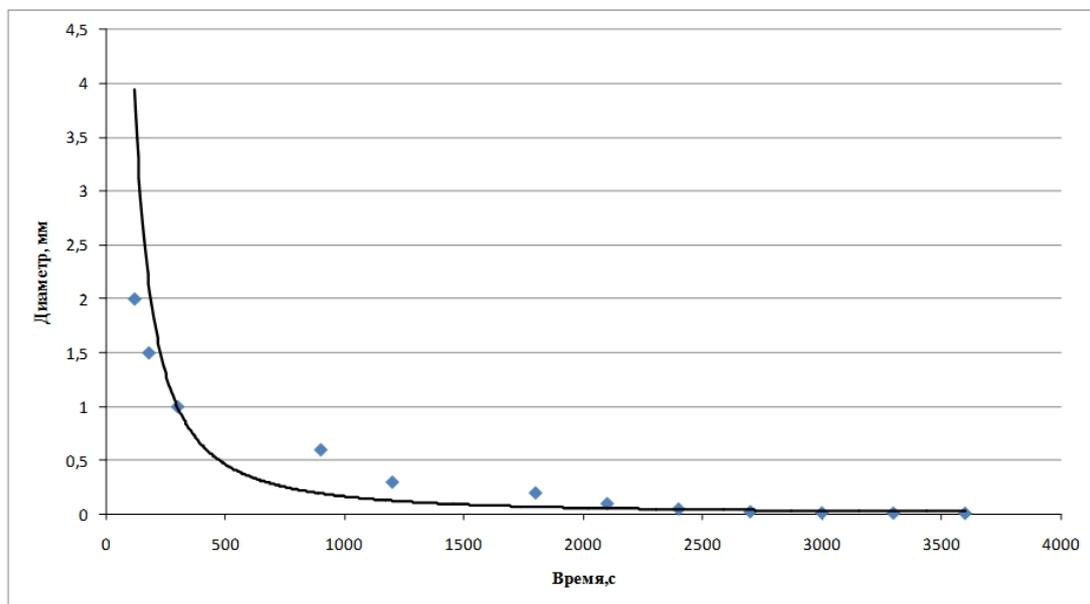


Рис. 2. Зависимость диаметра частиц бурового шлама от времени оседания в водной среде

С учётом значений начального и установившегося размеров частиц изменение диаметра во времени для рассматриваемого случая описывается следующим образом:

$$D(t) = 1,99 \exp(-0,00172t) + 0,01 \quad (3)$$

При использовании в уравнении (1) вместо постоянного диаметра частиц его функцию времени, оно примет следующий вид:

$$\frac{dv}{dt} = \left(1 - \frac{\rho_{жс}}{\rho}\right)g - \frac{18\eta}{\rho(D(t))^2}v. \quad (4)$$

Строгое аналитическое решение уравнения (1) с учётом начальных условий (при $t=0, D=D_0$) становится невозможным. Поэтому для решения данной задачи пользовались численным методом с использованием соответствующей программы Mathcad. В результате реализации настоящей программы получена искомая зависимость.

Таблица 1

Время, сек.	Масса осевших частиц, г.	Диаметр частиц, см		Скорость оседания, см/сек	
		расчет.	эксп.	расчет.	эксп.
1	-	-	-	320,0196	-
2	-	-	-	389,3623	-
3	-	-	-	403,6477	-
4	-	-	-	405,7108	-
5	-	-	-	405,0775	-
6	-	-	-	403,8554	-
7	-	-	-	402,5083	-
8	-	-	-	401,1377	-
9	-	-	-	399,7657	-
10	-	-	-	398,3972	-
120	-	0,162888	-	273,27	-
180	-	0,147014	-	222,54	-
300	-	0,119784	-	147,68	-
900	-	0,043322	-	19,3	-
1200	-	0,026262	-	7,09	-
1800	-	0,010001	-	1,03	-
2100	-	0,006373	-	0,42	-
2400	5,37	0,004207	0,004128	0,18	-
2500	5,89	0,0037	0,003703	0,14	-
2700	-	0,002914	-	0,087	-
2850	4,65	0,002479	0,002454	0,063	0,06
2900	3,68	0,002357	0,002315	0,057	0,055
2950	3,73	0,002245	0,002221	0,052	0,05
3000	-	0,002143	-	0,047	-
3100	3,72	0,001962	0,001958	0,039	0,04
3300	3,37	0,001682	0,001681	0,029	0,035
3600	-	0,001407	-	0,02	-
4100	3,15	0,001172	0,001198	0,014	0,015
4200	2,89	0,001145	0,001098	0,013	0,015
4300	2,75	0,001122	0,001032	0,013	0,014

Расчётная кривая для интервала времени наблюдений показана на рисунке 3. Для сравнения на график наложены экспериментальные точки, взаимное расположение которых свидетельствует о достаточном совпадении расчётных и экспериментальных значений скоростей оседания частиц. Для подтверждения данного обстоятельства были рассчитаны абсолютная и относительная погрешно-

сти, приведённые в таблице 2.

Как видно из таблицы, в целом результаты хорошо согласуются: средняя относительная погрешность составила 7,25%. Результаты расчётов, а также экспериментальных исследований позволили установить значение установившейся скорости, к которой стремятся текущие значения скорости при увеличении значения времени.

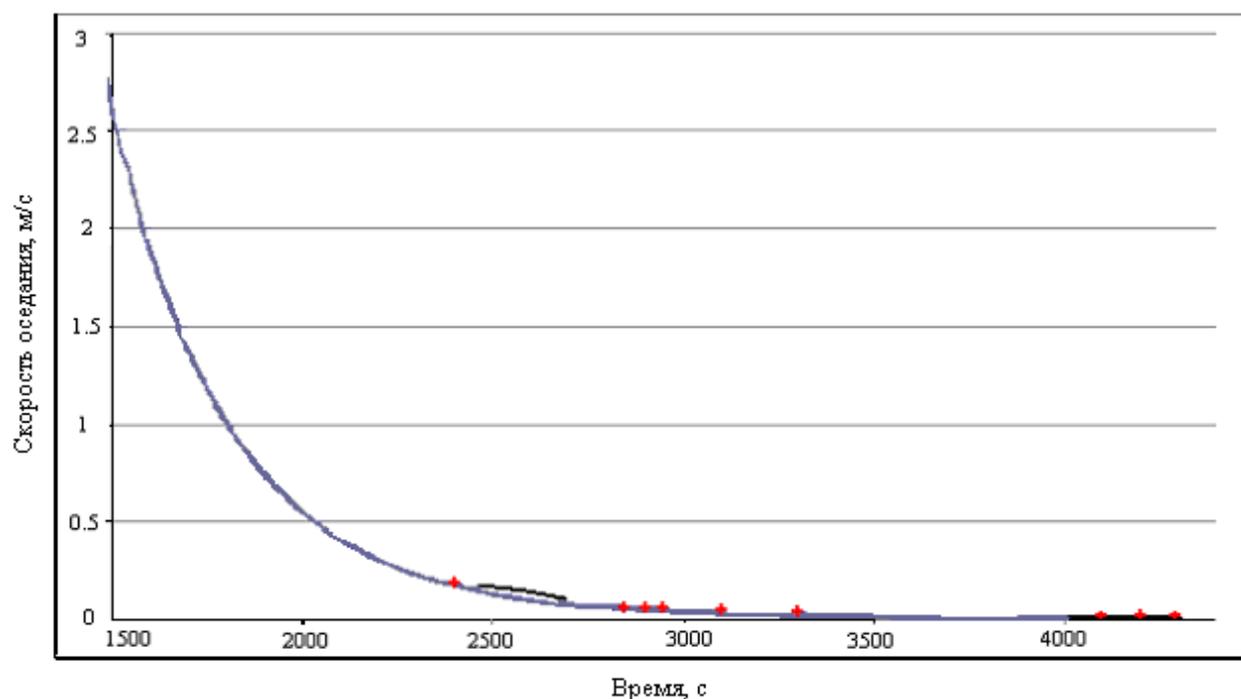


Рис. 3. Изменение расчётной скорости оседания частиц во времени

Таблица 2

Время, сек	Значение скоростей оседания, см /сек		Погрешности	
	Экспер.(Vэ)	Расчет. (Vр)	Vэ-Vр	Vэ-Vр/Vф*100, %
2400	0,18	0,182005601	0,002006	1,114222783
2500	0,17	0,140798266	0,029202	17,1774907
2850	0,06	0,063194798	0,003195	5,324663552
2900	0,055	0,057133845	0,002134	3,87971797
2950	0,05	0,05184111	0,001841	3,682220372
3100	0,04	0,039589269	0,000411	1,026828424
3300	0,035	0,029095292	0,005905	16,87059493
4100	0,015	0,014132367	0,000868	5,784217609
4200	0,015	0,013483631	0,001516	10,1091257
4300	0,014	0,012949228	0,001051	7,505513855
Ср. погрешность				7,25

Расчётная схема дает возможность проследить за процессом оседания в начальный момент времени, когда диаметр частиц сохраняется ещё постоянным. Анализ данной зависимости показывает, что в начальный момент времени наблюдается рост скорости оседания, что, как показали опыты и результаты расчётов, длится всего 4 секунды в рассматриваемых

условиях. В данном случае частицы не успевают диспергировать и ведут себя как шар с постоянным диаметром. Скорость оседания в данном случае равна скорости по Стоксу (www.mgpru.ru/download.php?id=2453).

Дальнейшее увеличение времени приводит к экспоненциальному снижению скорости оседания.

Таким образом, в результате выполненных экспериментальных и аналитических исследований можно прийти к следующему заключению:

- Разработана схема расчётов скорости оседания частиц буровых отходов, реализация которой позволяет получить закономерность её изменения во времени.
- Масса, диаметр и соответственно скорость оседания частиц буровых отходов экспоненциально снижаются во времени при их оседании, приближаясь к установившемуся для данной среды значению, которое остаётся постоянным при дальнейшем увеличении времени наблюдений.

Полученные результаты могут быть использованы для восполнения недостатка информации о количественных изменениях во времени вследствие диспергирования частиц при математическом моделировании процессов конвективного распространения шлама в водной среде.

Авторы считают своим долгом выразить глубокую благодарность академику М.Т.Абасову за продуктивное обсуждение результатов исследований, отраженных в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА

- БАЛАБА, В.И., КОЛЕСОВ, А.И., КОНОВАЛОВ, Е.А. 2001. Проблемы экологической безопасности использования веществ и материалов в бурении. ИРЦ Газпром. Москва. 76.
- ИНСТРУКЦИЯ ПО ОХРАНЕ окружающей среды при бурении скважин на нефть и газ на суше (РД 39-133-94). 1994. Роснефть. Москва.
- МАМЕДОВ, Р.М., ХАНЛАРОВ, А.Г. 2006. Эколого-географические аспекты моделирования процесса переноса шлама и бурового раствора при сбросе на поверхность моря. *Известия НАНА, Науки о Земле*, 3, 98-107.
- ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ жидкости методом Стокса. www.mgru.ru/download.php?id=2453
- ПАТИН, С.А. 2001. Нефть и экология континентального шельфа. ВНИРО. Москва.
- УОЛКЕР, Дж. 1983. Кофе по-турецки. *В мире науки*, 6, 114-118.
- ХАУСТОВА, А.П. (под ред.). 2006. Природопользование, охрана окружающей среды и экономика: Теория и практикум: Учебное пособие. РУДН. Москва. 613.
- 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.