

ОБ УСЛОВИЯХ ОТРЫВА ЧАСТИЦЫ ОТ СЕДИМЕНТАЦИОННОГО СЛОЯ В СДВИГОВОМ ПОТОКЕ

А.В. Серяков, О.Б. Бочаров, Я.С. Игнатенко

Новосибирский Технологический Центр компании Бейкер Хьюз
630090, Новосибирск, Россия

Введение. Одной из актуальных проблем при бурении наклонных и горизонтальных скважин на месторождениях углеводородов является вынос шлама из скважины. Неэффективная очистка затрубного пространства от частиц разбуриваемой породы приводит к забиванию кольцевого канала, образованию сальников, прихватам колонны и повышению давления на забое [1]. Для того, чтобы оценить подвижность слоя диспергированных обломков в скважине, используются расчетные данные, полученные на упрощенной модели, в которой фрагмент породы сферической формы начинает свое движение над неподвижным слоем. Основные интегральные характеристики такого движения – сила лобового сопротивления, подъемная сила и крутящий момент в зависимости от сдвигового Рейнольдса потока, являются входными параметрами в программах по сопровождению бурения для определения веса и расхода бурового раствора, скорости проходки, и т.д. [2].

Теоретический аспект проблемы – а именно, задача обтекания частицы для определения параметров ее начального движения – была рассмотрена рядом авторов в публикациях [3-5], где основные силовые характеристики получены при обтекании шарика вблизи гладкой стенки. Тем не менее, поскольку в скважинных условиях движение шлама происходит над неровным слоем такого же материала, несомненный интерес вызывает случай обтекания частицы вблизи шероховатой границы. Исследование течения вокруг гранул, расположенных над седиментационным слоем, выполнено на экспериментальных установках в работах [6,7]. Возросшие за последние годы вычислительные возможности позволили провести трёхмерное численное моделирование динамики частицы над шероховатой поверхностью. В настоящей работе мы следуем идеологии С. Балачандара, описанной в [8], и применяем ее для расчетов характеристик начала движения частиц.

Формулировка задачи. Рассматривается частица диаметром d , расположенная над шероховатой поверхностью, состоящей из полусфер того же диаметра, что и частица (Рис. 1 а). Полусферы расположены в сотовом порядке на подложке, при этом частица находится над лакуной, образованной тремя полусферами, закрасенными в зеленый цвет на рис. 1 б. Частица полагается неподвижной. При моделировании находятся гидродинамические силы, действующие на сферу, а также крутящий момент.



Рис. 1. Граничные условия и геометрия задачи.

Расстояние δ от частицы до шероховатой поверхности определяется из условия, что при $\delta=0$, частица касается нижних полусфер, находясь в лакуне.

Частица и седиментационный слой обтекаются сдвиговым потоком жидкости, движущимся вдоль оси X. Сдвиговой профиль скорости u задается на входе и характеризуется параметром $G = \partial u / \partial z$. Рассматривается ламинарное течение жидкостей с ньютоновской и степенной реологией в диапазонах сдвигового числа Рейнольдса Re_{SH} от 2 до 200 ($Re_{SH} = \rho_f G^{2-n} d^2 / k$, n – показатель степени, ρ_f – плотность жидкости, d – диаметр частицы, k – коэффициент густоты потока). Для моделирования используются гидродинамические пакеты ANSYS Fluent и Open FOAM.

В представляемой работе моделирование проводилось для частицы, расположенной на расстоянии $\delta=0.005d$ от шероховатости. Сила лобового сопротивления F_D потоку и подъемная сила F_L , а также крутящий момент M рассчитываются через поверхностный интеграл тензора напряжений жидкости по сферической частице. Соответствующие коэффициенты лобовой C_D и подъемной силы C_L , а также момента C_M определяются путем обезразмеривания на характерную силу F_0 , действующую на поперечное сечение частицы, которая вычисляется следующим образом $F_0 = 0.5 \cdot u_p^2 \rho_f \pi d^2 / 4$. Здесь u_p – “невозмущенная” скорость потока в центре частицы, рассчитанная для геометрии без частицы, то есть изменение сдвигового течения происходит только за счет шероховатости.

Выполнена проверка достоверности моделирования с помощью сопоставления результатов, полученных для Ньютоновской жидкости с данными, опубликованными в [8]. При этом сравнивались параметры C_D , C_L полученные как при различных числах Рейнольдса Re_{SH} , так и при различных расстояниях от шероховатости δ .

Результаты. Коммерческие системы, рассчитывающие характеристики выноса шлама, используют, как правило, корреляции для сил и моментов, полученных из расчётов для гладкой стенки. В связи с этим особый интерес представляет собой эффект, оказываемый шероховатостью, на условия страгивания частицы по сравнению со случаем ровной поверхности [5]. Сопоставление для Ньютоновской жидкости показывает, что в диапазоне Re_{SH} от 2 до 200 возрастает и сила лобового сопротивления, и подъемная сила для частицы над шероховатой стенкой. Крутящий момент также увеличивается. В целом, изменения в коэффициенте C_D составляют 5%, в коэффициенте C_L до 17%, и 7% для C_M . Для степенной реологии жидкости с показателем 0.6, основное отличие в подъемной силе для шероховатой и ровной стенки сосредоточено в области малых чисел Рейнольдса $Re_{SH} \sim 2-10$ – до 40%. Максимальные отклонения же остальных характеристик на всем диапазоне Re_{SH} составляют 25% для C_D и 40% для C_M .

Условие начального движения шарика по шероховатой поверхности можно получить из баланса моментов в точке касания частицы с полусферой, составляющей неровность. Для анализа удобно рассматривать число Шилдса τ_B , представляющее собой отношение характерного напряжения сдвига τ_{wall} на стенке к разности силы Архимеда и гравитационной силы. Рассматриваются два крайних случая выноса частицы: когда она начинает катиться по седиментационному слою, и когда она полностью отрывается и уносится потоком. Каждому указанному случаю соответствует неравенство на силы и моменты [5]. Переписывая неравенства для функции τ_B и выражая в них τ_{wall} через скорость сдвига G и вязкость жидкости, можно прийти к простым соотношениям, в которые входят коэффициенты C_D , C_L , C_M , а также Re_{SH} . Качение или отрыв при этом наступают, когда величина τ_B превышает критические значения τ_R и τ_L соответственно

$$\tau_R = 16 / \left[\sqrt{3} Re_{SH} \cdot (C_D + \sqrt{3} C_L + 2C_M) \right], \quad \tau_L = 16 / (3C_L Re_{SH}).$$

Сопоставление критических чисел Шилдса для шероховатой и ровной поверхности в случае степенной реологии жидкости с показателем 0.6 представлено на рис. 2.

Как можно заметить, параметр τ_R для неровной стенки лежит выше во всем диапазоне чисел Рейнольдса, и превышает число Шилдса для гладкой стенки на 27 %. Изменение параметра τ_L существенно больше – до 70% – в диапазоне малых чисел Рейнольдса, поскольку этот коэффициент напрямую зависит от поведения C_L .

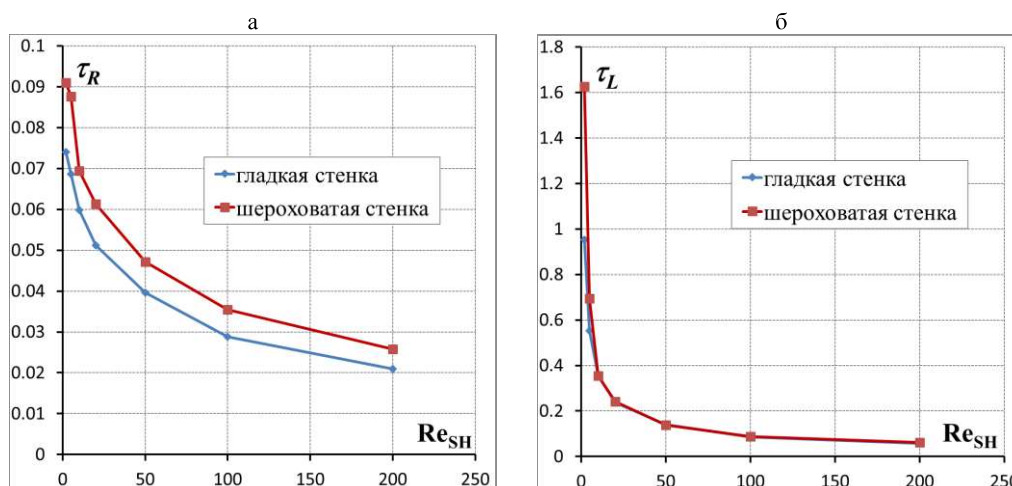


Рис. 2. Критические значения параметра Шилдса при которых наступает качение частицы по шероховатой поверхности (а) или отрыв и вынос потоком (б) в зависимости от сдвигового Рейнольдса Re_{SH} . Данные представлены для степенной реологии жидкости с индексом 0.6.

Проведенные исследования позволяют уточнить условия подвижности слоя шлама в скважине, что поможет эффективнее решать задачу очистки затрубного пространства при бурении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Nazari T., Hareland G., and Azar J.J.** Review of Cutting Transport in Directional Well Drilling: Systematic Approach // SPE 132372. SPE Western Regional Meeting in Anaheim CA. 2010.
2. **Маковей Н.** Гидравлика бурения: пер. с румынского, М.:Недра. 1986. 536с.
3. **Krishnan G. and Leighton D.** Inertial Lift on a Moving Sphere in Contact With a Plane Wall in a Shear Flow // Phys. Of Fluids. 1995. Vol. 7. P. 2538-2545.
4. **Zeng L., Najjar F., Balachandar S., and Fischer P.** Forces on a Finite-Sized Particle Located Close to a Wall in a Linear Shear Flow // Phys. of Fluids. 2009. Vol. 21. No. 033302.
5. **Ignatenko Y., Bocharov O., and May R.** Movement of a Sphere on a Flat Wall in Non-Newtonian Shear Flow // Int. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2017. OMAE2017-61131.
6. **Watters G.Z., and Rao M.V.P.** Hydrodynamic Effects of Seepage on Bed Particles // J. Hydraulic Division. 1971. Vol. 97. Issue 3. P. 421-439.
7. **Davis T.R., and Samad M.F.** Fluid Dynamic Lift on a Bed Particle// J. Hydraulic Division. 1978. Vol. 104. Issue 8. P. 1171-1182.
8. **Lee H., and Balachandar S.** Effect of Wall Roughness on Drag and Lift Forces of a Particle at Finite Reynolds Number //Int. J. of Multiphase Flow. 2016. Doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.09.006.