

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТА ШЛАМА ПРИ БУРЕНИИ НА ОСНОВЕ КОНТИНУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ

Я.С. Игнатенко<sup>1</sup>, О.Б. Бочаров<sup>1</sup>, Р. Мей<sup>2</sup>, А.А. Гаврилов<sup>3</sup>,  
А.В. Шебелев<sup>3</sup>, А.А. Дектерёв<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский Технологический Центр компании Бейкер Хьюз, 630090, Новосибирск,  
Россия

<sup>2</sup>Baker Hughes Inteq GmbH, 29221, Celle, Germany

<sup>3</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе, 660036, Красноярск, Россия

При бурении скважин разбуренная порода (шлам) выносится на поверхность буровым раствором с неньютоновскими реологическими свойствами. Течение буровой жидкости с частицами породы в кольцевом канале может быть, как ламинарным, так и турбулентным. Бурение наклонных и горизонтальных скважин осложняется осаждением шлама на стенку скважины. Таким образом, кольцевой канал может быть частично блокирован. Оптимизация процесса бурения требует понимания механизмов выноса шлама и образования блокирующих наносов. Засорённость канала и перепад давления, основные величины, интересующие инженеров при проектировании и оптимизации процесса бурения скважины. Рассматривается стационарное двумерное течение в канале.

Используется модель на основе континуального представления двухфазного дисперсного потока. Моделируется только одна фракция частиц, которые предполагаются сферами с постоянным диаметром  $d_s$ , плотностью  $\rho_s$ . Несущая жидкость – это неньютоновская жидкость, реология которой описывается моделью Хершеля–Балкли, с постоянным значением плотности  $\rho_f$ . Течение может быть как ламинарным, так и турбулентным. Смесь рассматривается как гетерогенная среда, где каждая фаза занимает лишь часть объема исследуемой области течения  $\alpha_k$  (объемная концентрация  $k$ -ой фазы).

Из гипотезы “сплошности”, имеем  $\sum_k \alpha_k = 1$ . Средние величины, характеризующие

смесь, определяются следующими соотношениями: плотность смеси -  $\rho = \sum_k \rho_k \alpha_k$ ,

среднемассовая скорость смеси -  $\rho \mathbf{u} = \sum_k \rho_k \alpha_k \mathbf{u}_k$ , массовая доля фазы -  $c_k = \rho_k \alpha_k / \rho$ . В

основе модели стационарного турбулентного течения суспензии лежит модель смеси с алгебраическим соотношением для относительной скорости  $\mathbf{u}_r = \mathbf{u}_s - \mathbf{u}_f$  дисперсной фазы [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Уравнения сохранения массы и количества движения смеси имеют вид

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot (\mathbf{T}_\mu + \mathbf{T}_t), \quad \mathbf{T}_\mu = 2\mu \mathbf{S}^d,$$

где  $\mathbf{T}_\mu$  – тензор вязких напряжений смеси,  $\mathbf{T}_t$  – тензор турбулентных напряжений,  $\mathbf{S}^d$  – девиатор тензора скоростей деформации смеси  $\mathbf{S} = 0.5(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)$ . Для вязкости смеси

используется эмпирическое выражение [Ошибка! Источник ссылки не найден.] с параметром  $\beta$ , позволяющим аппроксимировать различные экспериментальные данные -

$$\mu = \mu_f \exp \left\{ \frac{2.5}{\beta} \left[ \frac{1}{(1 - \alpha_s)^\beta} - 1 \right] \right\}, \quad \text{где } \mu_f = \begin{cases} k |\dot{\gamma}|^{n-1} + \tau_0 / |\dot{\gamma}| & \text{при } |\dot{\gamma}| > 0 \\ \infty & \text{при } |\dot{\gamma}| = 0 \end{cases} - \text{вязкость неньютоновской несущей фазы с реологическим законом Хершеля-Балкли. Турбулентные ха-}$$

тоновской несущей фазы с реологическим законом Хершеля-Балкли. Турбулентные ха-

рактические характеристики течения смеси определяются с использованием двухпараметрической RANS модели турбулентности  $k-\omega$  SST [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. В случае неньютоновской жидкости, применяется упрощенный вариант разработанной ранее модели [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Уравнение переноса массовой доли дисперсной фазы  $c_s$  с учётом скольжения между фазами приобретает вид:  $\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)c_s = -\nabla \cdot (\rho c_s c_f \mathbf{u}_r)$ , а относительная скорость находится из алгебраического уравнения:

$$\rho_s \mathbf{u}_r = \tau_p \left[ (\rho_s - \rho_f)(\mathbf{g} - (\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u}) - \frac{1 - \alpha_s}{\alpha_s} \nabla p_s - \frac{1}{\alpha_s} (\mathbf{F}_L + \mathbf{F}_{vm} + \mathbf{F}_t) \right],$$

где  $p_s$  – нормальные напряжения в дисперсной фазе,  $\mathbf{F}_t \tau_p$  – импульс частиц за счёт турбулентной дисперсии,  $\mathbf{F}_L$  – подъемная сила Сэффмана в сдвиговом потоке,  $\mathbf{F}_{vm}$  – сила при соединённой массы [Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден. 7]. Время релаксации дисперсной фазы  $\tau_p$  определяется исходя из закона для силы сопротивления стеснённого осаждения частиц [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

$$\tau_p = (1 - \alpha_s)^{m-2} \tau_{p0}(\text{Re}_r),$$

где  $\tau_{p0}(\text{Re}_r)$  – определяется как функция относительного числа Рейнольдса исходя из заданного закона сопротивления при движении одиночной сферической частицы в безграничном потоке.

Для моделирования напряжений континуума частиц используется изотропный вариант модели баланса суспензии (suspension balance model - SBM) [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:

$$p_s = \mu_f \alpha \dot{\gamma}$$

где  $\alpha(\alpha_s)$  – эмпирическая безразмерная функция, зависящая только от концентрации частиц. Для описания диффузии частиц за счёт турбулентных пульсаций используется

градиентная гипотеза [Ошибка! Источник ссылки не найден.]:  $\tau_p \mathbf{F}_t = \rho_s \alpha_s \frac{v_t}{\sigma_t} \frac{\nabla \alpha_s}{\alpha_f \alpha_s}$ ,

где  $\sigma_t$  – турбулентное число Шмидта,  $v_t = \mu_t / \rho$  – турбулентная вязкость смеси.

На рисунке 1 приведено сравнение перепада давления, полученного в работе [Ошибка! Источник ссылки не найден.] экспериментально, с численными результатами. Несущая среда – масло с плотностью  $\rho_f = 867 \text{ кг/м}^3$  и вязкостью  $\mu_f = 1.440 \text{ Па}\cdot\text{с}$ . Диаметр цилиндрического канала 53 мм, средний диаметр частиц песка  $d_p = 430 \text{ мкм}$ , плотность частиц  $\rho_s = 2650 \text{ кг/м}^3$ . Рассматривались течения со средней объемной концентрацией частиц 20%. Модель хорошо предсказывает распределение скоростей, концентрации и перепад давления (рис. 1) в случае ламинарного течения ньютоновской жидкости.

В работе [Ошибка! Источник ссылки не найден.] проведено экспериментальное исследование течения неньютоновской жидкости в цилиндрическом канале, приведен перепад давления. Диаметр канала  $D = 0.056 \text{ м}$ , диаметр частиц дисперсной фазы  $d_p = 0.001 \text{ м}$ , плотность дисперсной фазы  $\rho = 2400 \text{ кг/м}^3$ . В качестве несущей жидкости использовалась смесь воды и сухого порошка каолина. Реологические параметры: плотность  $\rho_f = 1096 \text{ кг/м}^3$ , предел текучести  $\tau_0 = 7.34 \text{ Па}$ , индекс консистенции  $k = 0.0747 \text{ Па}\cdot\text{с}^n$ , показатель степени  $n = 0.6435$ . Из рисунка 2 видно, что при малых скоростях в слу-

чае ламинарного течения, модель хорошо предсказывает перепад давления. С ростом скорости и переходом в турбулентный режим, модель завышает перепад давления с ошибкой до 15%.

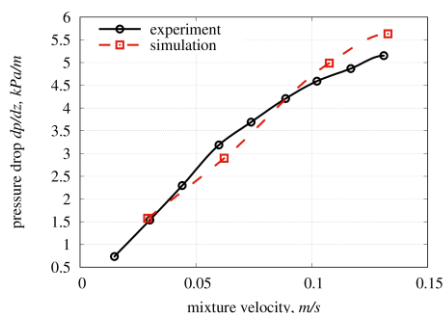


Рис. 1. Перепад давления в зависимости от скорости смеси потока. Ньютоновская жидкость.

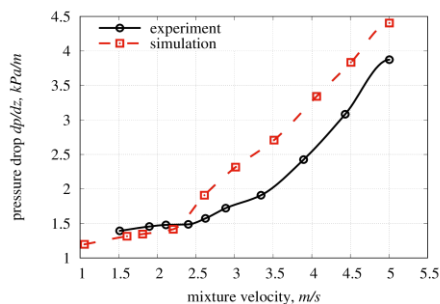


Рис. 2. Перепад давления в зависимости от скорости смеси потока. Жидкость Хершеля-Балкли.

Представленная модель хорошо описывает ламинарные течения ньютоновских и неньютоновских жидкостей с частицами. Модель склонна завышать перепад давления для турбулентных течений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Manninen M., Taivassalo V., Kallio S.** On the mixture model for multiphase flow / Ed. by Leena Ukskoski. Julkaisija Utgivare, 1996.
2. **Cheng N.-S., Law A. W.-K.** Exponential formula for computing effective viscosity // Powder Technology. 2003. Vol. 129.
3. **Gavrilov A. A., Rudyak V. Ya.** Reynolds-averaged modeling of turbulent flows of power-law fluids // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2016. Jan. Vol. 227.
4. **Gavrilov A. A., Finnikov K. A., Podryabinkin E. V.** Modeling of steady Herschel-Bulkley fluid flow over a sphere // Journal of Engineering Thermophysics. 2017. Apr. Vol. 26.
5. **Saffman P. G.** The lift on a small sphere in a slow shear flow - corrigendum // Journal of Fluid Mechanics. 1968. Feb. Vol. 31.
6. **McLaughlin J. B.** Inertial migration of a small sphere in linear shear flows // Journal of Fluid Mechanics. 1991. Mar. Vol. 224.
7. **Bocharov O. B., Ignatenko Ya. S.** Force acting on a particle in unsteady flow of a pseudoplastic fluid // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2016. Dec. Vol. 57. P. 1069–1075.
8. **Richardson J., Zaki W.** Sedimentation and fluidisation: Part i // Chemical Engineering Research and Design. 1997. Vol. 75.
9. **Miller R. M., Morris J. F.** Normal stress-driven migration and axial development in pressure-driven flow of concentrated suspensions // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2006. Vol. 135.
10. **Gillies R. G., Shook C. A., Xu J.** Modelling heterogeneous slurry flows at high velocities // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2004. Vol. 82.
11. **Kabengele K.** Identification of flow patterns for coarse particles transported in a non-Newtonian carrier using electrical resistance tomography: Ph.D. thesis / Kantu Kabengele ; Cape Peninsula University of Technology. 2012.