

**ВОЗМОЖНОСТИ ЭЙЛЕРОВО-ЭЙЛЕРОВА И ЭЙЛЕРОВО-ЛАГРАНЖЕВА ПОДХОДОВ
ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕЧЕНИЙ МНОГОФАЗНЫХ СМЕСЕЙ И ОЧИСТКИ КОЛЬЦЕВОГО
ПРОСТРАНСТВА СКВАЖИН ОТ ШЛАМА**

Джанхорбни Мехран

Научный руководитель профессор Харламов С.Н.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Введение. Хотя вопросы гидротранспорта шлама в вертикальных скважинах достаточно давно исследуются и имеют ряд подтвержденных опытом решений, проблема построения решений и прогноза течений смесей бурового раствора со свойствами неньютоновской жидкости типа Гершеля-Балкли (ГБ) с твердыми частицами выбуренной породы через эксцентричное горизонтальное кольцевое пространство ещё остается открытой [1-4]. В моделировании данного процесса обращаются к двум подходам механики гетерогенных сплошных сред. В первом предполагают, что, например, в дисперсной смеси из капельной жидкости с твердыми частицами обе фазы представляют собой сплошную среду (эйлерово-эйлеров (ЭЭ) подход) и во втором (эйлерово-лагранжев (ЭЛ) подход), только несущая (диспергированная) среда (т.е. раствор) описывается моделью сплошной среды, тогда как динамика частиц твердой (дисперсной) фазы и траектории каждой отдельной частицы рассчитываются отдельно в рамках дискретного приближения. В данной работе, авторы используют оба подхода с *целью*: уяснить особенности и возможности подходов в моделировании и прогнозе закономерностей процесса гидротранспорта при бурении горизонтальных скважин.

Детали моделирования. В данном исследовании был выбран канал длиной 10 м, состоящий из пространства между двумя трубами, расположенными параллельно, но эксцентрично относительно друг друга. Диаметр внешней трубы, представляющей ствол скважины равен 20 см и диаметр внутренней трубы, представляющей бурильную колонну равен 12 см. В качестве несущей среды была выбрана вода, поступающая в канал со скоростью 1 м/с (с числом Рейнольдса порядка 80,000) и в качестве твердой фазы применялись сферические частицы песка диаметром 6 мм и с плотностью 2650 кг/м³. Расчетная сетка была выбрана так, чтобы погрешности моделируемого значения перепада давления при концентричном расположении труб (для которого имеется аналитические и полуэмпирические решения [1-4],) была меньше 5 % в турбулентном и ламинарном режиме, и разница между полученными значениями перепада давления с более тонкой сеткой составляла меньше 2%. В конечном итоге, была выбрана сетка с расширением 50*60*50, имеющая 137500 ячеек. В качестве модели турбулентности была выбрана модель SST k- ω [1,2], которая широко используется из-за своей относительной простоты (по сравнению, например, с моделью напряжений Рейнольдса [1,2]) и из-за того, что способна удачно моделировать течение в пристеночной и свободной зонах потока. В качестве замыканий привлекаются пристеночные функции, которые работают в диапазоне $U^+ < 30-300$ [1,2,5]. Сравнения результатов расчетов течений в трубах с эксцентричностью и экспериментальными данными (например, [6, 7]) показывали, что с увеличением эксцентричности перепад давления уменьшается. Это свидетельствует о корректности алгоритма и модели процесса с SIMPLE-C методом определения поля давления. Расчетами установлено, что в области длины трубы (через 4 метра от входа), профиль скорости и напряжение на стенках стабилизируются. Это свидетельствует, что выбранная длина канала достаточно для формирования автомодельного течения.

Детали описания подходов. При ЭЭ подходе, уравнения сохранения массы и импульса (уравнения Навье-Стокса) решается для обеих фаз с учётом их объемной доли в виде [1-4]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (1)$$

Здесь q и p обозначают фазы, α — это объемная доля фазы, ρ — это плотность, v -это скорость, m — это обмен масса с одной фазы в другую (равно 0 в нашем случае) и S — это источник массы (равно 0 в нашем случае)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) + \sum \vec{F} \quad (2)$$

Здесь τ — это тензор напряжений и R — это межфазная сила, для определения которой, существует ряд соотношений, например, Гидаспоу [8], Сиамлал-Обриен [9] или Вен-Ию [10]. В данном случае соотношение Гидаспоу было использовано. Хотя разные исследователи показали, что соотношение Сиамлал-Обриен то же даёт похожие результаты при замыканиях определяющих уравнений. F — это разные силы, действующие на фазы как, например, подъемная сила.

При ЭЛ подходе, только несущая среда рассматривается как сплошная и траектории каждой частицы твердой фазы вычисляются путем интегрирования уравнения (3):

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (3)$$

Здесь индекс “ p ” обозначает частицы, F_D - сила лобового сопротивления и F_x — все другие возможные силы, например, сила термофореза, сила Саффмана или Магнуссена. Но, так как они значительные только при очень малых размерах частиц здесь ими пренебрегаем. Силу лобового сопротивление можно вычислять так:

СЕКЦИЯ 16. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ В НЕФТЕГАЗОВОМ ДЕЛЕ

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24}, \quad (4)$$

где d_p – это диаметр частиц и Re – это относительное число Рейнольдса, которое определяется так:

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu}. \quad (5)$$

Коэффициент C_D для сферических частиц определяется как:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (6)$$

Здесь коэффициенты a_i являются экспериментальными [11].

Результаты. Моделирование было проведено на ПО ANSYS FLUENT на ПК с ядром Intel i7-8700 CPU (с 12 ядрами, 3,2 ГГц) в неустановившемся режиме. Было смоделировано 10 с течения. В итоге, моделирование с ЭЭ подходом дает объемную концентрацию шлама в канале как 2,57 %. При ЭЛ подходе получена данная концентрация как 2,91 %, т.е. на 11,4 % выше ЭЭ подхода. Оба результата находятся в разумном диапазоне по сравнению с экспериментальными данными [12], но при этом моделирование с ЭЭ подходом занимало 15 дней, причем расчет с ЭЛ подходом завершился затратами большими на 8 часов.

Заключение. Расчетами установлено следующее: *ЭЭ подход* имеет три недостатка: 1. Занимает много времени, например, моделирование одного цикла течения, состоящего 10 секунд, на нормальном ПК занял 15 дней. 2. Основан на приближенных связях. Типа уравнения Гидаспоу, Сиамлал, Вен-Ию и других все обоснованы на кинетической теории движения частиц. Другими словами, они моделируют движение частиц твердой фазы, как молекул газа вплоть до определения гранулярной температуры для них, подобно температуре газа. Таким образом, этими замыканиями можно моделировать многофазное движение частиц твердой фазы как газообразной, но диапазон возникающих погрешностей в результате подобных допущений и упрощений неизвестен. В комбинации с приближительной природой моделей турбулентности, полученные результаты этим методом, могут быть весьма ненадежными. 3. Рекомендуется для случаев, где объемная доля твердой фазы превышает 10 %, т.е. когда частицы твердой фазы формируют слой, подобно слою жидкости. Тогда можно их рассматривать как сплошную среду. Показано, что *ЭЛ подход* не имеет подобных недостатков. Однако, для него характерно, что с ростом числа частиц, расчёты становятся громоздкими, требуют много оперативной памяти компьютера. Поэтому на стандартных ПК рекомендуется использовать ЭЛ подход только для случаев с числом частиц меньше 100.000. Установлено, что при возможности, т.е. при малых значениях размеров твердых частиц, ЭЭ подход предпочтителен. Оба подхода дают результаты, находящиеся в диапазоне реальности и на 12% отличаются друг от друга, аналогично данным [13]. К тому же, ЭЛ подход даёт информацию о траекториях частиц, что невозможно при использовании ЭЭ подхода.

Литература

1. Харламов С.Н., Джангхорбани М., Филиппов К.А. Математическое моделирование и методы исследования гидродинамической очистки горизонтальных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 8, ст. 53-73.
2. Харламов С. Н., Джангхорбани М. Численное моделирование течений вязких смесей бурового шлама и потока сырой нефти на горизонтальных участках скважин с эксцентричными буровыми трубами // Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа-XXI век. – 2021. – С. 221-224.
3. Шищенко Р.И., Есьман Б.И., Кондратенко П.И. Гидравлика промысловых жидкостей. – М.: Недра, 1976 – 294 с.
4. Guo B., Liu G. Applied drilling circulation systems: hydraulics, calculations and models. – Gulf Professional Publishing, 2011.
5. Chmielewski M., Gieras M. Three-zonal wall function for k-ε turbulence models // Computational methods in science and technology. – 2013. – Т. 19. – №. 2. – С. 107-114.
6. Dokhani V. et al. Effects of drill string eccentricity on frictional pressure losses in annuli // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Т. 187. – С. 106853.
7. Подрябинкин Е.В. Моделирование течений ньютоновских и неньютоновских жидкостей в цилиндрическом зазоре: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2014. – 28 с.
8. Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. – Academic press, 1994.
9. Computer simulation of bubbles in a fluidized bed // AIChE Symp. Ser. – Publ by AIChE, 1989. – Т. 85. – №. 270. – С. 22-31.
10. Wen C. Y. Mechanics of fluidization // Chem. Eng. Prog. Symp. Ser. – 1966. – Т. 62. – С.100-111.
11. Morsi S. A. J., Alexander A. J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems // Journal of Fluid mechanics. – 1972. – Т. 55. – №. 2. – С. 193-208.
12. Costa S. S. et al. Simulation of transient cuttings transportation and ECD in wellbore drilling // Europec/EAGE Conference and Exhibition. – OnePetro, 2008.
13. Epelle E. I., Gerogiorgis D. I. Transient and steady state analysis of drill cuttings transport phenomena under turbulent conditions // Chemical Engineering Research and Design. – 2018. – Т. 131. – С. 520 -544.