

Подходы к моделированию бриджинга при транспорте пропанта в трещинах гидроразрыва пласта: теория и эксперимент

*И.А. Гарагаш (Институт физики земли РАН),
С.А. Боронин, А.А. Осипцов (Сколковский институт науки и технологий),
А.Н. Рожков (Институт проблем механики РАН)*

Известные в литературе двумерные модели транспорта пропанта в трещине гидроразрыва пласта (ГРП) основаны на приближении тонкого слоя. Типичная модель содержит уравнение переноса для концентрации частиц, закон Пуазейля для усредненной скорости жидкости, выраженной через градиент давления с коэффициентом мобильности жидкости, а также квазиэллиптическое уравнение для давления. Замыкающие соотношения включают полуэмпирические выражения для скорости осаждения, вязкости суспензии, и критерий бриджинга.

Детально рассмотрены замыкающие соотношения для бриджинга (запираания) и мобилизации частиц при течении суспензии в трещине ГРП. Поскольку речь идет о потоке округлых частиц, находящихся в контакте, то их упаковка постоянно меняется и, следовательно, меняется занимаемый ими объем. Если это происходит в большом пространстве, то это не влияет на стенки. Если размер щели близок к эффективному объему, то его дилатансия может привести к запираанию просвета и образованию препятствия (бриджинг).

Движение пропанта рассматривается как медленное движение ансамбля обладающих дилатансией кластеров в вязкой среде. Такая жидкость обладает внутренней структурой и может моделироваться моментной средой с несимметричным тензором напряжений. В рамках механики сплошных сред это приводит к предположению, что вектор напряжения на любой площадке имеет некоторый эксцентриситет и, кроме тензора напряжений, вызывающего скорости деформаций элементарного параллелепипеда и его вращения, действуют изгибающие и крутящие моменты, обуславливающие кривизну граней. Учет моментов приводит к асимметрии тензора напряжений (нарушению закона парности касательных напряжений) и появлению наряду с макроскопическими вращениями кинематически независимых микроповоротов отдельных фрагментов. Для такой среды существует внутренний масштабный фактор, который может быть сопоставлен с характерным размером кластеров. Следуя данной методологии и рассматривая случай плоской деформации, можно прийти к конечному соотношению либо численно задаваемой функциональной зависимости, являющейся уточненным критерием бриджинга частиц в трещине ГРП.

Для калибровки замыкающих соотношений для бриджинга предложено проводить эксперименты по моделированию движения частиц в тесненных условиях. В частности, использование имеющихся прозрачных ячеек и каналов в сочетании с визуализационными методами позволяет проследить детали взаимодействия частиц и образование запирающихся структур в ограниченных объемах. Имеются также возможности для измерения скорости жидкости, перепада давления и сдвигающих напряжений.