О МЕХАНИЗМЕ ТВЕРДЕНИЯ НЕСТАБИЛЬНОГО СИЛИКАТНОГО ВЯЖУЩЕГО НА МЕЗОУРОВНЕ СИСТЕМЫ (МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОНЫ СЖИМАЕМОГО ОСАДКА)*

Сидоренко Ю.В.
Самарский государственный архитектурно-строительный университет, Самара

Вопросы механики многокомпонентных систем рассматривались в трудах Ф.И. Франкля, Н.А. Слёзкина, Х.А. Рахматулина, Р.И. Нигматулина и др. исследователей. Так, в основе механики многоскоростных континуумов, по данным Х.А. Рахматулина [1], для твёрдых и жидких фаз находится переход от дискретных пространств к их непрерывным взаимопроникающим аналогам – континуумам, причём гидродинамические параметры статистически усредняются по объёму.

Для постановки задачи моделирования зоны сжимаемого осадка [2] вводим ряд упрощений и допущений:

- полагаем, что рассматриваемая область находится в достаточном удалении от порога перколяции и влияние тепловых факторов на неё незначительно; поэтому режим принимаем изотермическим и ламинарным;
- рассматриваем двухфазную среду, пренебрегая газовой составляющей и твёрдыми остаточными фазами;
- не учитываем гравитационную составляющую в уравнениях импульсов;
- пренебрегаем поверхностными микроэффектами, считая размеры агрегатов больше 1 мкм;
- пренебрегаем вторичным гидратообразованием в вяжущем, так как, например, по данным [3], их количество незначительно и они слабо влияют на прочность сырца;
- частицы твёрдой фазы рассматриваем сферическими, несжимаемыми;
- принимаем стационарный режим, считая, что фильтровальная перегородка возникает внезапно при t=0;
- перколяционный переход осуществляется в бесконечно-тонком слое при концентрации твёрдой нестабильной фазы $\varphi = \varphi_т$*;
- предполагаем, что движение агрегатов в рассматриваемой области происходит без процессов агрегации и дробления.

Основы теории коагуляции были заложены М. Смолуховским; В.Г. Левич решал подобную задачу с учётом турбулентных пульсаций, М.Я. Фукс - с учётом преодоления энергетического барьера. А.Н. Крайко и А.А. Шрайбер рассматривали проблему коагуляции с учётом перехода энергии частицам или несущей фазы, В.В. Кафаров с сотрудниками - с учётом вторичного зародышеобразования, истирания кристаллов и их роста. Вероятностное агрегирование на уровне двух частиц рассматривалось Н.Б. Урьевым [4, 5]. В практической плоскости разработанный механизм агрегации реализован только для процесса осаждения частиц. Б.М. Долгоносов [6, 7] считает, что в сдвиговых потоках размер агрегата (частицы) поддерживается равновесным.

Рассмотрим элементарный объём в рассматриваемой области и применим к нему осреднённые уравнения механики взаимопроникающих скоростных континуумов с учётом вышеприведённых допущений.

Для каждой из фаз:

$$r_1 = r_i^0 \cdot j_i\,, \qquad r_{см} = \sum j_i \cdot r_i^0, \qquad \sum j_i = 1\,, \qquad (i = 1,2)$$

$$j_2 = \int_0^R f(r)\cdot r\cdot dr, \qquad r_2 = \int_0^R r_2^0 \cdot f(r)\cdot r dr, \qquad (1),$$

где r_i^0 – истинная плотность *i*- й фазы; j_i - объёмное содержание *i*-й фазы; j - твёрдой фазы, $(1-j)$ - жидкой среды.

Уравнения сохранения масс.

Для жидкой фазы:

$$\frac{\partial(1-j)}{\partial t} + div((1-j)\cdot V_1) = 0 \quad , \qquad (2).$$

Для твёрдой фазы уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial j}{\partial t} + div(j\cdot V_2) = 0\,, \qquad (3).$$

Уравнения импульсов.

Для жидкой несущей фазы:

$$(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V}_1\nabla)\cdot r_1^0\cdot(1-j)\cdot\mathbf{V}_1 = -\nabla((1-j)\cdot P_1) + m\,div(1-j)\nabla\mathbf{V}_1 + \mathbf{F_{21}} \quad , \qquad (4).$$

Первое и второе слагаемые правой части характеризуют осреднённое напряжение в жидкой фазе (осреднённое давление и тензор вязких напряжений). Последний член в (4) учитывает влияние на несущую фазу межфазных поверхностных взаимодействий.

Уравнение импульсов для твёрдой фазы:

$$(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V}_2\nabla) r_2^0 j\mathbf{V}_2 = -\nabla j\ P_1 + \nabla s_2^f - \mathbf{F}_{12} \quad , \qquad (5).$$

Алгебраическая сумма первого и второго слагаемых правой правой части представляет осреднённые напряжения в твёрдом фазе, а последний- межфазное воздействие жидкости на твёрдую фазу. В (2) - (5): ***V₁, V₂,*** - осреднённые по вероятности векторы скоростей жидкой и твёрдой фаз, ***F₁₂, F₂₁*** – осреднённые значения межфазных сил, φ - вероятностная концентрация твёрдой фазы в рассматриваемом объёме, P_1 и s_2^f – осреднённые давление в жидкости и эффективный тензор напряжений в твёрдой фазе.

Представленная совокупность уравнений достаточно сложна и нуждается в упрощении. Так как диаметр рассматриваемого горла мал, то можно пренебречь изменением кинематических параметров по поперечной оси y (в этом случае $dP_1/dy=0$). Согласно [8, 9], инерционные эффекты учитываются для скоростей от 1м/с. Скорости фаз в поровой системе чрезвычайно низки (Re <<1), и это позволяет пренебречь инерционными членами в левых частях в уравнениях (4), (5).

Для формирования простейшей модели зоны сжимаемого осадка предполагаем, что рост давления в поре-истоке и увеличение сопротивления контактно-конденсационной перемычки изменяются симбатно, что обеспечивает постоянный расход вяжущего через горло, т.е. рассматриваем квазистационарный режим.

Исключая в левых частях элементы нестационарности, получим:

$$\nabla((1-j)\mathbf{V}_1) = 0\,, \qquad (6),$$

$$\nabla(j\ \mathbf{V}_2) = 0\,, \qquad (7),$$

$$-\nabla((1-j)\mathbf{P}_1) + m\nabla(1-j)\nabla\mathbf{V}_1 + \mathbf{F}_{21} = 0\,, \qquad (8),$$

$$-\nabla(j P_1) + \nabla s_2^f - \mathbf{F}_{12} = 0\,. \qquad (9).$$

Складывая (6) и (7), получаем постоянство расхода суспензии:

$$\nabla V_c = 0\,; \quad V_c = const\,, \qquad (10).$$

Принимая капилляр- горло достаточно длинным ($l >> r$), ограничимся одномерным случаем:

$$\nabla_x((1-j)V_1) = 0\,, \qquad (11),$$

$$\nabla_x(j V_2) = 0\ \ , \qquad (12),$$

$$-\nabla_x((1-j)P_1) + m\nabla_x(1-j)\nabla_x V_1 + F_{21} = 0\,, \qquad (13),$$

$$-\nabla_x(j P_1) + \nabla_x s_2^f - F_{12} = 0\,. \qquad (14).$$

Полученная система позволяет проследить в квазистационарном режиме динамику отложения осадка, изменение его пористости и потерь давления, расход фильтрата. Так, в пренебрежении вязкостной составляющей в (13) для неподвижного осадка ($V_2=0$):

$$(1-j)\cdot V_1 = const = J_\phi\,, \qquad (15),$$

$$e^2\frac{ds}{de}\frac{de}{dx} = fJ_\phi\,; \quad (e = 1\text{-}j)\,, \qquad (16).$$

получаем зависимость пористости по длине (в форме записи Н.А. Марцулевича и Г.М. Островского [10]). Применение этой зависимости с учётом уравнений уплотнения осадка и взаимодействия фаз позволило авторам [10] выяснить, что, например, для глиноземистых суспензий половина общего перепада давления на неподвижном осадке приходится на узкую зону вблизи фильтрующей перегородки. Если в (14) принять, что межфазная сила сжимает скелет, то из системы уравнений получаем:

$$-\frac{1}{mr}\frac{\partial P}{\partial x} = (1-j)V_1 - ej\,V_2.$$

В частности, в [11] получена модель консолидации осадка, записанная не только относительно давления, но и коэффициента пористости.

Кинетика роста контактно-конденсационной перемычки в процессе приложения нагрузки при прессовании силикатной системы определяется действием двух противоречивых факторов. С одной стороны, рост давления прессования, по законам гидродинамики приводит к увеличению расхода

гетерогенного потока через горло капилляра, что способствует интенсификации процесса контактной конденсации. С другой стороны, происходит кольматация капилляров и возрастает ширина самой перемычки, что увеличивает её сопротивление деформации. Деформация матрицы перемычки в виде уменьшения её пористости под действием нагрузки также увеличивает её сопротивление. Со временем окончание продвижения жидкости через перемычку будет означать завершение процесса контактной конденсации в горле капилляра.

В связи с предложенной схемой формирования контактно-конденсационной перемычки нами разработана следующая классификация фазовых необратимых контактов между структурными элементами [2]:

а) классическая односторонняя, которая возникает при одностороннем движении потока из области истока в сток;

б) двухсторонняя с пробкой (жидкость, газовая фаза); в этой схеме сжимаемая фаза играет деструкционную роль в прочности контакта. Такая схема возникает в том случае, когда два соседних истока разделены капилляром- горлом и среды вяжущего движутся навстречу друг другу;

в) двухсторонняя с центральной областью касания, которая возникает при встречном движении дисперсионных потоков, однако из центральной зоны газ и разупрочённый фильтрат уходят в более мелкие капилляры.

Моделирование гетерогенной среды через капиллярно-пористое тело достаточно проработано в трудах П.Г. Романкова, И.М. Федоткина, Ю.И. Капранова и др. Процесс движения двухфазной гетерогенной среды через капиллярно-пористое тело моделируется в общем виде совокупностью уравнений материального баланса по твёрдой фазе, нелинейного уравнения фильтрации, кинетики отложения твёрдой фазы в капиллярах. Зона капиллярно-пористой перемычки является основным элементом в процессе контактной конденсации, так как на её основе формируются элементарные силовые звенья, совокупность которых (в виде перколяционного кластера) и будет формировать силовой каркас сырца изделия. Предлагаемые подходы к моделированию позволят проследить влияние гидродинамических и силовых полей на ширину этой зоны, степень её пористости для различных частных случаев. Так, учет переменного давления позволяет выявить динамику развития капиллярно-пористой перемычки и оптимальное время для прессования. Рассмотренная выше модель должна быть дополнена краевыми условиями (без учёта кольматации конденсационной перемычки) [2]. Реализация модели позволит оценить динамику наращивания прочности единичного контакта.

* В рамках гранта, финансируемого Министерством образования и науки Самарской области в 2006 г., наименование НИР: “Моделирование механизма твердения нестабильного силикатного вяжущего на мезоуровне системы” (раздел - 364Т3.13 П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рахматулин Х.А. Основы гидродинамики взаимопроникаемых движений сжимаемых сред. // ПММ. – 1956. - №20. - С.185-191.

2. Сидоренко Ю.В. Моделирование процессов контактно-конденсационного твердения низкоосновных гидросиликатов кальция: Дисс. ... канд. техн. наук. - Самара, 2003. - 217 с.

3. Хавкин Л.М. Технология силикатного кирпича. – М.: Госстройиздат, 1982. – 384 с.

4. Урьев Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. – М.: Химия, 1980. - 320 с.

5. Урьев Н.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов. - М.: Химия, 1988. -256 с.

6. Долгоносов Б.М. Механическое истирание твердых частиц при столкновениях со стенкой в турбулентном потоке. // Коллоидный журнал.- 1991.- Т.53, №5. - С. 843-849.

7. Долгоносов Б.М. Параметры равновесного спектра частиц в коагулирующей системе с распадом агрегатов. // Коллоидный журнал.- 2001.- Т. 63, № 1. - С. 39 – 42.

8. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред.– М.: Наука, 1987. - 360 с.

9. Николаевский В.Н. и др. Механика насыщенных пористых сред. – М.: Недра, 1970. - 339 с.

10. Марцулевич Н.А., Островский Г.М. Моделирование процесса фильтрования с образованием сжимаемого осадка. // ТОХТ.- 1999. - Т.33. - №2. - С.136 - 139.

11. Федоткин И.М., Воробьёв Е.И., Вьюн В.И. Гидродинамическая теория фильтрования суспензий. – Киев: Вища школа, 1986. - 166 с.