

Эксперимент и математическое моделирование
в механике сплошных сред

Куропатенко В.Ф.

456770, г. Снежинск, ул. Васильева, 13
V.F. Kuropatenko@vniitf.ru

Модель сплошной среды благодаря широкому применению для решения многих научных и технических проблем в течение ряда лет играет важную роль в жизни человечества. Основные уравнения сплошной среды – это законы сохранения массы, импульса и энергии в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных. Система законов сохранения дополняется уравнениями состояния и определяющими уравнениями, которые несут информацию о свойствах конкретного вещества. В сплошной среде могут возникать сильные, слабые и контактные разрывы. Величины по обе стороны таких разрывов (бесконечно тонких поверхностей) связаны уравнениями, являющимися следствиями законов сохранения. На сильных разрывах – ударных волнах происходит диссипация энергии.

Экспериментальное изучение свойств сплошных сред, проявляемых при нагревании, сжатии, растяжении или сдвиге, в течение многих лет ограничивалось областью относительно низких температур и давлений (плавление, испарение, тепловое объёмное расширение и др.). Точность основной массы накопленной таким путём информации достаточна для инженерных применений, но недостаточна для прецизионного прогнозирования отклика вещества на различные воздействия. Область экспериментального изучения свойств веществ существенно расширилась после применения взрывчатых веществ в качестве источника энергии. Почти по всем элементам и по многим соединениям измерены характеристики ударных волн однократного сжатия. Тем не менее в настоящее время нет достаточно надёжной информации о параметрах ударных волн в области упругих и пластических деформаций. Взрывы атомных устройств позволили измерить параметры ударных волн в области экстремальных состояний вещества всего лишь для нескольких веществ. Однако и в этой области погрешности измеренных значений скорости ударной волны и скорости вещества, по которым пересчитываются значения давления и плотности, являются большими, что недостаточно для калибровки прецизионных моделей.

Согласно современным взглядам, понятие сплошной среды является не более чем математической абстракцией. Любое тело – жидкость, газ, твёрдое тело, плазма, состоит из микрочастиц (молекулы, атомы, электроны, ионы и т.д.), каждая из которых имеет свою массу, скорость и внутреннюю энергию. Совокупность микрочастиц является дискретной средой. Моделирование дискретной среды на микроуровне не по силам даже современной вычислительной технике из-за огромной плотности микрочастиц (в 1 см^3 воздуха находится примерно $3 \cdot 10^{19}$ молекул). Любой объём, заполненный микрочастицами почти пуст, т.к. отношение расстояния между атомами к размерам атомных ядер, в которых содержится основная масса вещества, значительно больше, чем отношение расстояния от солнца до планет к диаметру солнца. Переход от дискретной среды к сплошной среде обоснован строго с помощью мгновенных законов сохранения. Это относится к плотности, скорости и энергии. Однако, переход от сил взаимодействия микрочастиц к параметрам сплошной среды – давлению и напряжениям сдвига требует создания новых более точных моделей.

Совершенно неудовлетворительна точность экспериментального изучения многокомпонентных сред под действием динамических нагрузок или быстрого разогрева, приводящих к тиксотропии и резкому изменению характера взаимодействия компонентов смеси.

Практически отсутствуют экспериментальные данные о поведении вещества в области тройной точки.

Результаты физических экспериментов нужны для калибровки физических и математических моделей поведения вещества, применяемых для математического моделирования. Современная вычислительная техника развивается очень быстро. Через несколько лет будет достигнута производительность экзафлопного уровня. Фактически это вызов механике и вычислительной математике. В механике сплошных сред формулировка законов сохранения в дифференциальной форме завершилась к 1870 г. созданием моделей пластического течения. До настоящего времени эти модели изменились мало. На их основе были созданы математические методы, позволяющие рассчитывать на ЭВМ ударные волны и волны разрежения в одномерной, двумерной и трёхмерной постановках. Как правило, это однородные методы, обладающие дистракцией и размазывающие сильные и слабые разрывы на несколько сеточных ячеек. В некоторых задачах (например, откольное разрушение, взаимодействие разрывов, течения со сферической или цилиндрической симметрией) эти свойства однородных методов приводят к ошибкам. Практически все современные математические модели содержат эмпирические (подгоночные) параметры, значения которых подбираются так, чтобы результаты расчётов описывали эксперимент.

Модели механики сплошной среды и численные методы образуют неразрывную систему уравнений, применяемых для математического моделирования динамических процессов в сплошных средах. В работе рассматриваются фрагменты этой системы, которые нуждаются в существенном повышении точности.

Работа поддержана РФФИ, грант № 13-01-00072