

С.А. Лопаткин, Е.Н. Шелухин

Томский политехнический университет

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ КЛАСТЕРНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОВЗРЫВА В ОБЪЕМЕ МАТЕРИАЛА

Известно, что взрыв – крайне быстрое выделение энергии, связанное с внезапным изменением состояния вещества, сопровождаемое деформированием окружающей среды, в которой при этом образуются особого рода возмущения – ударные или взрывные волны, имеет место переход начальной энергии в энергию движения вещества. В том случае, когда исходным видом энергии является электрическая, говорят об электровзрыве [1].

Разряд емкостного накопителя через проводник приводит к мгновенному разрушению последнего с образованием разрядного плазменного канала. Ввод энергии в канал приводит к его расширению, деформации окружающего материала и образованию ударных волн.

Электровзрыв позволяет в достаточно широких пределах регулировать энерговыделение в разрядном канале и тем самым влиять на поле напряжений вокруг канала, определяя картину деформации материала. В связи с этим основной задачей повышения эффективности применения электроразрядных технологий является согласование режимов энерговыделения при разряде с характеристиками генерируемой волны. При этом крайне актуальным является математическое моделирование, позволяющее, не прибегая к экспериментам, проследить динамику развития процесса [2].

Анализ модели электровзрыва сводится к решению значительного числа уравнений для большого количества взаимосвязанных ячеек среды. Использование классических методов решения задач подобного рода, как правило, связано с большими временными затратами. В данном случае очевидным представляется использование распределенных систем вычисления, позволяющих значительно ускорить решение поставленной задачи.

Математическая модель и программная реализация.

Компьютерная модель электровзрыва реализовывалась с использованием технологии распределенных вычислений MPI [3] (Message Passing Interface) для последующих расчетов на суперкомпьютерном кластере СКИФ ТПУ. Алгоритм программы представляет собой цикл параллельных вычислений с одним главным потоком-мастером.

В основу математической модели электровзрыва положена схема преобразования энергии накопителя в канальной стадии разряда (рис. 1). Энергия накопителя при разряде конденсатора частично теряется в активном сопротивлении разрядного контура и при взрыве проводника, а основная ее часть выделяется в расширяющемся разрядном канале. Последняя составляющая расходуется на образование и нагрев плазмы, а также на работу по ее расширению, т.е. на энергию ударной волны. Энергия волны трансформируется во внутреннюю энергию материала и энергию его движения [2].

Модель электровзрыва включает в себя: уравнения Кирхгофа для разрядного контура и уравнения для взрыва проводника; уравнение энергобаланса плазменного канала и систему уравнений, описывающих импульсное деформирование среды вокруг канала и динамику ударной волны в материале.



Рис. 1. Схема распределения энергии генератора

Проводник и образующийся на его месте разрядный плазменный канал приближенно могут быть представлены в виде идеальных цилиндров (рис. 2, а). На небольших расстояниях от разрядного канала ударная волна также имеет цилиндрическую

форму, а следовательно, ее развитие может быть рассмотрено с применением цилиндрической сетки (рис. 2, б), ячейки которой имеют одинаковые начальные параметры (давление, плотность и т.д.).

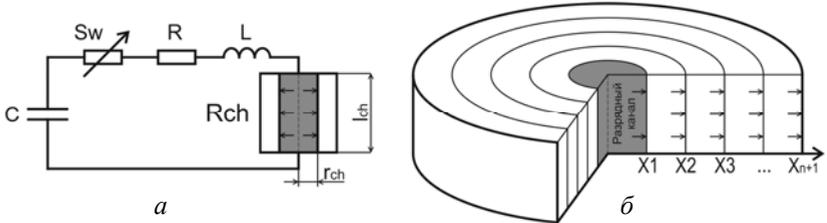


Рис. 2. Разрядный контур (а), среда распространения ударных волн (б)

На начальной стадии электроразрядного процесса поток-мастер анализирует взрыв проводника в соответствии с известной теорией [4] и задает параметры для последующего моделирования.

В начале каждой итерации основного цикла программы поток-мастер задает шаг моделирования по времени dt . Шаг выбирается таким образом, чтобы ударная волна проходила первую ячейку сетки за 5 или более итераций, тем самым обеспечивается стабильность модели:

$$dt = \frac{\Delta X}{hCw}, \quad h = 5, 6, \dots \quad (1)$$

Далее путем решения уравнений Кирхгофа производится расчет переходных процессов в разрядном контуре за время, равное dt , и определяется введенная в разрядный канал энергия, а также оцениваются активные потери энергии в контуре:

$$L \frac{di}{dt} + (R + R_{ch})i = U_C, \quad \frac{dU_C}{dt} = -\frac{i}{C}; \quad (2)$$

$$W_{ch}(t) = \int_0^t i^2(t) R_{ch}(t) dt, \quad W_R(t) = \int_0^t i^2(t) R dt. \quad (3)$$

Сопротивление разрядного канала, образующегося после взрыва проводника, находится через интеграл действия тока по соотношению Ромпе–Вайцеля:

$$R_{ch}(t) = Al_{ch} / \sqrt{\int_0^t i^2(t) dt}, \quad (4)$$

где A – искровая постоянная материала.

Связь электротехнической части процесса с волновой динамикой в среде устанавливается с помощью уравнения энергобаланса

$$dW_{ch} = P_{ch} dV_{ch} + \frac{d(P_{ch} V_{ch})}{(\gamma - 1)}. \quad (5)$$

Первое слагаемое описывает приращение работы, совершаемой расширяющимся каналом при изменении его объема V_{ch} под действием давления внутри канала P_{ch} . Второе – энергия плазмы, расширяющейся в адиабатическом приближении с показателем γ [2].

На данном этапе поток-мастер обрабатывает имеющийся массив данных и разбивает его на части. После этого происходит рассылка по потокам [5]. Поскольку каждая ячейка сетки неразрывно связана с соседними, используется ленточное разделение массива (рис. 3).

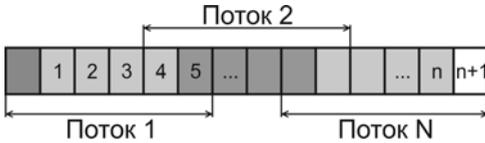


Рис. 3. Ленточное разбиение массива

После получения данных каждый поток начинает цикл расчета деформаций среды. Этот этап включает в себя решение уравнений законов сохранения импульса, массы и энергии в лагранжевых координатах для цилиндрической симметрии [6]:

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{\Delta P}{\rho \Delta X}, \quad U = U + dU, \quad \frac{dX}{dt} = U, \quad X = X + dX; \quad (6)$$

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{\Delta X_0}{\Delta X} \right), \quad P = B \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right). \quad (7)$$

При определении скорости движения стенок ячеек для стабилизации модели при росте плотности вводится искусственная вязкость в соответствии с зависимостью

$$Q_n^t = 2a \Delta U^2 / \left(\frac{1}{\rho_{t-1}} + \frac{1}{\rho_{t-2}} \right). \quad (8)$$

По завершении расчетов поток-мастер собирает все части массива воедино и производит его анализ. После этого основной цикл переходит на новую итерацию.

В процессе роста разрядного канала близлежащие к нему ячейки сильно сжимаются, при этом модель становится крайне нестабильной, а также уменьшается шаг по времени, что приводит к сильному возрастанию времени моделирования. Для решения этой проблемы при сжатии ячеек до критически малого размера соседние ячейки попарно объединяются.

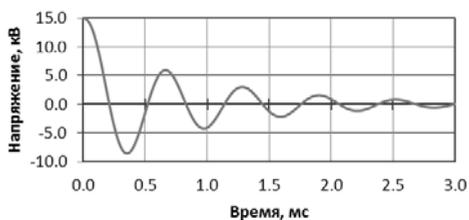
Энергия волны W_w , состоящая из суммы внутренней W_p и кинетической W_k энергий, рассчитывается по соотношениям:

$$W_w = W_k + W_p; \quad (9)$$

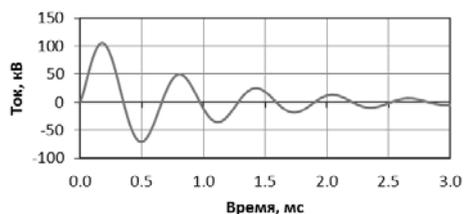
$$W_k = 2\pi l_{ch} \int_{r_{ch}}^{X_m} e(X) \rho(X) dX, \quad W_p = \pi l_{ch} \int_{r_{ch}}^{X_w} u^2(X) \rho(X) dX. \quad (10)$$

Для проверки адекватности модели было проведено моделирование разрядного процесса в воде, в качестве накопителя использовался генератор импульсных токов (15 кВ, 96 мкФ). Полученные результаты представлены на рис. 4 и хорошо совпадают с данными оценочного расчета [1].

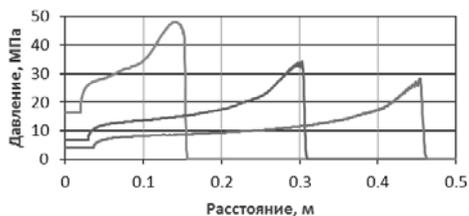
Оптимизация расчетного процесса. В связи с возникшей потребностью моделирования перед разработчиками встал ряд проблем, не имеющих прямого аналитического решения, в частности необходимость выбора оптимальных параметров установки. Возникшие проблемы могут быть достаточно просто решены путем проведения многократного анализа исходной модели электрического взрыва при различных входных параметрах, т.е. решения большого числа задач.



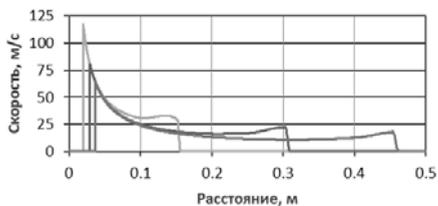
1



2



3



4

Рис. 4. Результаты моделирования: 1, 2 – осциллограммы напряжения и тока; 3, 4 – давление и скорость ударной волны в воде через 0,1 мс, 0,2 мс, 0,3 мс

Наилучшие условия для решения одной задачи (2^{16} ячеек) определялись путем автоматического подбора. Первоначально задача решалась с использованием 40 процессов, затем их число изменялось на 5 и сравнивалось время, затраченное на решение

задачи, для каждого из вариантов. В конечном счете было установлено, что максимальное число процессов, дающих прирост производительности для решаемой задачи, – 52.

Известно, что с увеличением количества задействованных в расчете процессов эффективность использования аппаратных ресурсов снижается [3]. Очевидно, что наиболее разумным решением данной проблемы является сокращение числа использованных процессов для одной задачи с одновременным запуском нескольких параллельных задач (рис. 5).

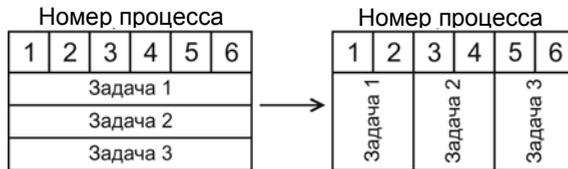


Рис. 5. Переход от последовательных задач к параллельным

Для оценки прироста производительности измерялось время обработки задачи для 50 процессов и той же задачи для 10. Время расчета составило 150.31 с и 416.19 с соответственно. Очевидно, производительность при решении 5 задач параллельно возросла в 1,8 раза.

$$5t_{50} / t_{10} = 751,55 / 416,19 \approx 1,8. \quad (11)$$

В процессе исследований была разработана и протестирована модель электровзрыва в объеме материала. Программная реализация модели адаптирована для расчетов на высокопроизводительных кластерных системах, использующих технологию распределенных вычислений MPI.

В процессе выполнения работы был определено максимальное число процессов, дающих прирост производительности для решения одной задачи, а также обоснована оптимальная схема распределения аппаратных ресурсов, заключающаяся в решении нескольких задач одновременно.

Результаты моделирования имеют хорошее совпадение с экспериментальными. Таким образом, вычислительные возможности кластерных систем позволяют решать сложные ре-

сурсоёмкие задачи, что даёт исследователю возможность четко представлять характер поведения ударной волны в материале при различных режимах и условиях.

Список литературы

1. Усов А.Ф., Семкин Б.В., Зоновьев Н.Т. Переходные процессы в установках электроимпульсной технологии. – Л.: Наука, 1987.
2. Буркин В.В., Кузнецова Н.С., Лопатин В.В. Волновая динамика электровзрыва в твердых диэлектриках. // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. Вып. 5. – С. 42–48.
3. Антонов А.С. Параллельное программирование с использованием технологии MPI: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГУ, 2004.
4. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Воеводин В.В. Вычислительная математика и структура алгоритмов. – М.: Изд-во МГУ, 2006.
6. Уилкинс М.Л. Расчет упруго-пластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967.

Е.В. Лысь, В.В. Лисица, Г.В. Решетова, В.А. Чеверда

Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА

Проведение акустического каротажа в районах со сложным геологическим строением, повсеместное использование наклонных и горизонтальных скважин ведёт к необходимости существенного углубления понимания процессов формирования и распространения сейсмоакустических полей в трёхмерно-неоднородных средах с учётом таких особенностей горных пород, как анизотропия и поглощение. К сожалению, аналитическое описание такие волновые