

параметров режима и определение норм времени на выполнение операций сварки и расчет норм расхода сварочных материалов, и информационно-справочные системы, предназначенные помочь конструктору или технологу принять проектные решения о выборе способа сварки, оборудования, свариваемых и сварочных материалов, типов сварных соединений.

Эффективность внедрения системы достигается сокращением трудозатрат на технологическую подготовку производства и материальных затрат за счет более точных, технически обоснованных расчетов.

УДК 631.31: 631.431

**ИССЛЕДОВАНИЕ БЕССЕТОЧНОГО МЕТОДА ГАЛЕРКИНА-ПЕТРОВА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДЕФОРМАЦИИ ТОРФЯНОГО СУБСТРАТА С ПРИМЕНЕНИЕМ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

*Медведев С.В., д-р. техн. наук, Шахрай Д.С.*

*(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)*

Бессеточные методы или методы частиц в настоящее время находят свою применимость в вычислительной механике. Они не требуют создания сетки и, таким образом, они подходят для решения некоторых задач, например, адаптивного вычисления или проблем распространения трещин. Кроме того, интерполяции функций в бессеточных методах являются особенно привлекательным в присутствии больших напряжений, сосредоточенных сил и больших деформаций [1].

С другой стороны, с практической точки зрения, конечные элементы являются менее затратными в машинном времени. Тем не менее, процесс генерации сетки для некоторых проблем незначительно отличается от бессеточных методов.

Существует практика применения обоих методов, используя преимущества каждого и с конечно элементной сеткой, и бессеточных.

Это значительно упрощает задание основных граничных условий. Они делают смешанные интерполяции в переходной области: область, где взаимодействуют конечные элементы и частицы [2].

Такие методы наиболее применимы для решения задач, в которых при взаимодействии материалов происходит образование сложных форм. Решение в классической постановке (МКЭ) таких задач будет давать некорректный результат, либо выдавать ошибку решения (рисунок 1, а).

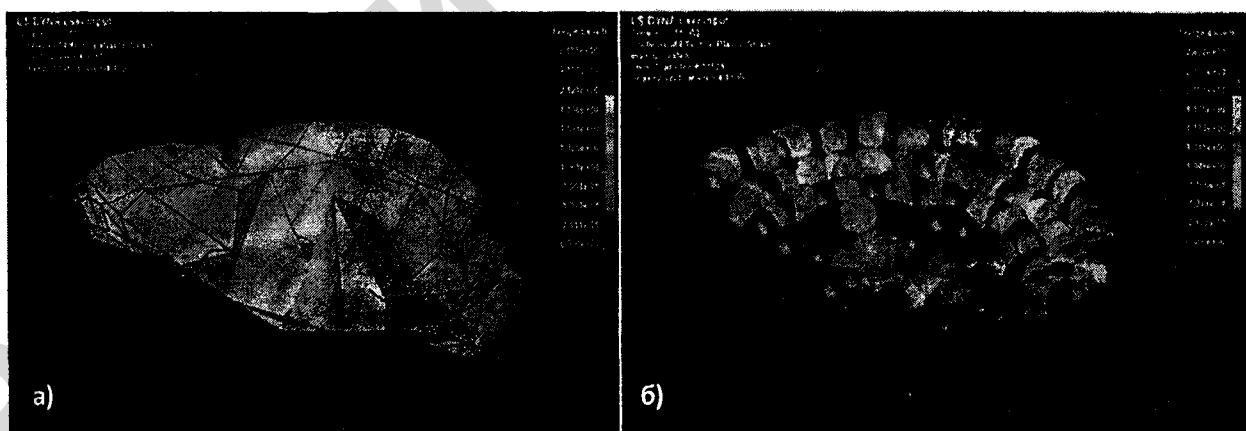


Рисунок 1 – Классическая (а) и бессеточная (б) постановки задач

В LS-DYNA постановка решения в бессеточном виде производится с помощью команд \*CONTROL\_EFG и \*SECTION\_SOLID\_EFG. В такой постановке задачи не строится сетка конечных элементов, и, соответственно, отсутствует возможность искажений формы элементов, которые значительно влияют на точность вычислений (рисунок 1, б).

Сравнение решения задач в классической (МКЭ) постановке и бессеточным методом Галеркина-Петрова проводилось при исследовании работы пуансона лункообразователя технологической линии для высева семян в кассеты. Был проведен ряд экспериментов с компьютерным моделированием задач деформирования торфяного субстрата в различной постановке. Для ускорения численного моделирования использован неявный режим LS-DYNA, который активируется с помощью карт \*CONTROL\_IMPLICIT\_AUTO (активирует автоматический контроль шага по времени), \*CONTROL\_IMPLICIT\_GENERAL (активирует неявный режим), \*CONTROL\_IMPLICIT\_SOLUTION (выбирает линейный и нелинейный метод решения, допустимые отклонения при сходимости), \*CONTROL\_IMPLICIT\_SOLVER (выбирает параметры для решения системы линейного уравнения  $[K]\{x\}=\{f\}$ ).

На рисунке 2 представлен график изменения полной энергии системы при решении задачи методом конечных элементов (МКЭ). При этом явно выделяются участки скачков графика, которые образовались в результате деформации сетки. Такие дефекты влияют на точность полученных результатов.

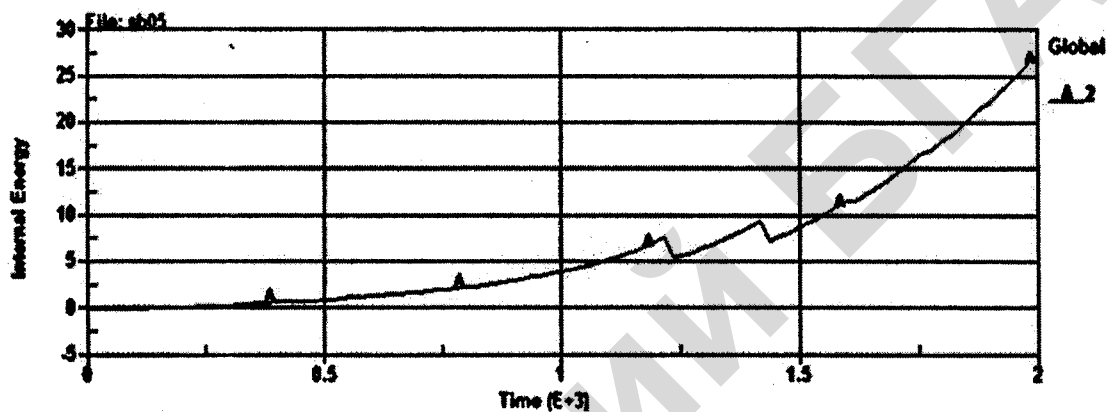


Рисунок 2 – График полной энергии. Метод конечных элементов

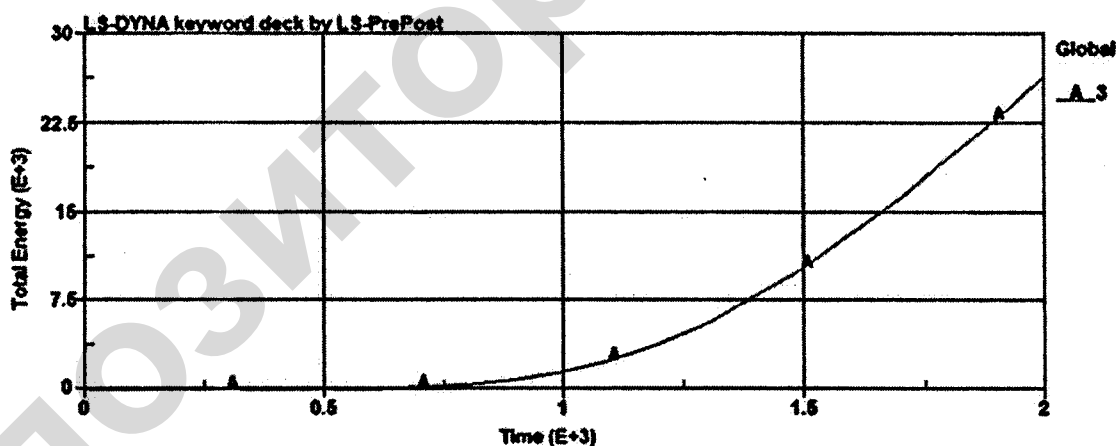


Рисунок 3 – График полной энергии. Бессеточный метод Галеркина-Петрова

На рисунке 3 представлен график изменения полной энергии системы при решении задачи бессеточным методом Галеркина-Петрова (EFG, Element free Galerkin). При этом график более плавный, без скачков, что свидетельствует о более точном реагировании элементов на деформации.

При этом стоит отметить один недостаток бессеточного метода Галеркина-Петрова – значительные требования к компьютерным мощностям, который можно устранить использованием мощностей суперкомпьютеров, существенно ускоряющих решение задач. Сравнение времени решения на различных компьютерах и в различной постановке представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение времени решения задач

Компьютер	Acer Aspire E1-571G, Intel B960 processor (2,2 GHz) RAM 2 ГБ		СКИФ-GPU, 32 processors (2,93 GHz) RAM 24 ГБ [3]	
	МКЭ	EFG	МКЭ	EFG
Метод решения	МКЭ	EFG	МКЭ	EFG
Время решения, ч	85	685	1	8-24

Таким образом, для достижения наиболее точных результатов моделирования процессов, связанных с достаточно большими деформациями материала, в частности, взаимодействия рабочих органов с субстратом (почвой), необходимо комплексное применение бессеточных методов решения задач с использованием суперкомпьютерных технологий. Это не исключает достоинств классических методов решения, но в дальнейшем открывает новые возможности в развитии аграрной науки в целом.

Дальнейшее изучение бессеточного метода Галеркина-Петрова позволит перейти к моделированию более сложных процессов, происходящих при обработке почвы, смешивании материалов и других сельскохозяйственных операций.

#### Литература

1. R. Bötticher, Advances in Adaptive Thermal- mechanical Metal-forming simulations in LS-DYNA. Bamberg, 2006.
2. Gong, Y., Yang, Z.G., Yuan, J.Z.: Failure analysis of leakage on titanium tubes within heat exchangers in a nuclear power plant. Part II. Mechanical degradation. Mater. Corros.63, 18–28 (2012)
3. Информационные технологии программы Союзного государства «Триада». Основные результаты и перспективы : сб. науч. тр. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2010. – 304 с.