

УДК 622.001.63:004.031.42

А.А. ХРУЦКИЙ, канд.техн.наук, доц., Ю.И. ЧУМАК, ст. преподаватель.,
Ю.И. ВИТИТНЕВ, ст. преподаватель., А.С. ЛИФЕНЦОВ, ст. преподаватель.,
Криворожский национальный университет

ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Цель. Определение рациональных областей применения современных методов компьютерного моделирования для решения основных видов задач при проектировании горных машин и оборудования.

Методы. Основным методом является сравнительный анализ возможностей методов компьютерного моделирования с точки зрения решения основных видов задач проектирования горнорудного оборудования.

Научная новизна. Выделены следующие виды задач при проектировании горнорудного оборудования: определение поведения материала деталей машин в процессе её работы; определение кинематики и динамики звеньев механизмов машины; определение особенностей взаимодействия деталей и узлов машины с горной породой, находящейся в монолите или россыпью; определение режимов работы, как отдельной машины, так и комплекса оборудования. Проведен анализ современных методов компьютерного моделирования с точки зрения решения основных видов задач при проектировании горных машин и оборудования.

Практическая значимость. На основе анализа существующих методов компьютерного моделирования разработаны рекомендации по их применению для решения задач проектирования горнорудного оборудования: для определения поведения материала деталей машины в процессе её работы, а так же кинематики и динамики звеньев механизмов машин может быть использован метод конечных элементов; для моделирования взаимодействия деталей и узлов горных машин с монолитной породой может быть использован метод SPH, а для моделирования поведения породы в россыпи - метод DEM; для определения режимов работы оборудования могут быть использованы методы компонентно-ориентированного моделирования сложных систем.

Результат. Составлена классификация основных задач проектирования горнорудного оборудования и методов компьютерного моделирования. Выполнен анализ широко применяемых методов компьютерного моделирования и проанализированы их преимущества и недостатки. Раскрыта эффективность использования этих методов и обоснован их выбор для решения каждого вида задач проектирования горнорудного оборудования.

Ключевые слова: проектирование и конструирование горных машин, компьютерное моделирование, метод конечных элементов, метод гидродинамики сглаженных частиц, метод дискретных элементов, метод компонентно-ориентированного моделирования сложных систем.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. На сегодняшний день компьютерное моделирование с применением расчетных экспериментов позволяет значительно ускорить, упростить и удешевить проведение проектно-конструкторских работ и научных исследований при разработке новой техники. Известно довольно много различных методов компьютерного моделирования и их модификаций. Каждый метод создавался для своего круга задач.

При проектировании горного оборудования, наряду с общеинженерными задачами, возникают не стандартные расчетные задачи, обусловленные спецификой горнодобывающей отрасли. Постоянное возрастание объемов проектных работ и усложнение конструкций оборудования требует изыскания прогрессивных методов моделирования и расчета оборудования, обеспечивающих максимально точное и быстрое решение задач проектирования.

Анализ исследований и публикаций. Методы компьютерного моделирования, в общем случае, предназначены для решения систем дифференциальных уравнений в трёхмерном пространстве с учётом граничных условий, которыми являются закрепления, контакты между деталями (при моделировании сборок) и внешние нагрузки.

Исходя из проведённого анализа литературных источников [1,4,5,6,8-15], можно выделить следующие основные группы методов компьютерного моделирования: сеточные и бессеточные.

К сеточным методам относятся методы, в которых для нахождения решения исследуемая область разбивается на отдельные простейшие элементы, образующие расчётную сетку [1,4,6]. К этой группе относятся метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод конечных объёмов и их модификации.

Основным недостатком таких методов является не способность определять большие деформации начальной сетки и разрушение тел, что не даёт возможности решать задачи, связанные с разрушением хрупких тел.

Бессеточные методы изначально были разработаны для решения задач с телами непостоянной формы и объёма (жидкости), имеющими большие деформации, а так же расчёта поведения хрупких тел [6,8,11,12,13,14,15]. Отказ от сеток дал возможность снять ряд ограничений сеточных методов, однако потребовал увеличения вычислительных ресурсов. Тем не менее, сегодня, с развитием мощностей вычислительной техники, эти методы получают все большее распространение. Основными методами этой группы являются метод гидродинамики сглаженных частиц и метод дискретных элементов.

Отдельно стоит упомянуть ещё об одном подходе, который предназначен для моделирования работы систем, которые можно представить в виде отдельных блоков - графов, связанных друг с другом. Это компонентно-ориентированное моделирование [5,9,10]. В отличие от предыдущих методов здесь расчёт ведётся не в трёхмерной области, а по сети графов, каждый узел которой представляет из себя тело, устройство или явление, поведение которого описывается известной зависимостью.

Постановка задачи. Определение основных видов задач при проектировании горных машин и оборудования и проведение анализа современных методов компьютерного моделирования, их особенностей и технических возможностей, а так же определения рациональных областей их применения для решения задач горного машиностроения.

Изложение материала и результаты. На основе опыта проектирования и конструирования горных машин можно выделить следующие расчетные задачи [2,3,7]:

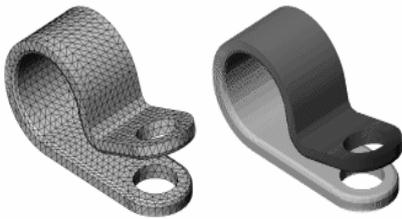
- определение поведения материала деталей машины в процессе её работы;
- определение кинематики и динамики звеньев механизмов машины;
- определение особенностей взаимодействия деталей и узлов машины с горной породой, находящейся в монолите или россыпью;
- проектирование пневматических и гидравлических систем;
- определение взаимодействия деталей с жидкостью или газом при проектировании гидро- или пневмосистем;
- определение режимов работы, как отдельной машины, так и комплекса оборудования.

Рассмотрим существующие методы компьютерного моделирования с точки зрения возможности решения выше перечисленных задач.

Основным и широко распространенным методом, применяемым при компьютерном моделировании, является метод конечных элементов и его модификации.

Метод конечных элементов (МКЭ) и его модификации [1,4,6] (рис. 1) является сеточным методом решения систем дифференциальных уравнений в пространственной области.

Рис. 1. Метод конечных элементов



В настоящее время этот метод является стандартным сеточным методом, используемым при решении задач механики упругого твердого тела посредством численных алгоритмов. Он занимает лидирующее положение благодаря возможности моделирования широкого круга объектов и явлений.

Рассмотрим некоторые виды задач, которые могут быть решены с применением МКЭ: определение перемещения, силы реакции, нагрузки, напряжения и распределение запаса прочности для конструкций в упругой зоне, постановка и решение контактных задач, расчет деталей и узлов для линейного и нелинейного поведения материалов;

определение собственных частот и ассоциированных форм колебаний; определение собственных частоты и форм (мод) колебаний для вычисления реакции конструкций на динамическое нагружение среды исследование потери устойчивости с помощью линейных динамических моделей;

анализ усталостных напряжений и определение ресурса конструкций, основанные на событиях усталости материалов и кривых усталости;

исследования на ударную нагрузку оценивают влияние быстротекущих динамических процессов;

определение температуры, градиента температуры и теплового потока на основе теплового выделения, теплопроводности, конвекции и условий излучения;

комплексный динамический и кинематический анализ механизмов, определение скоростей, ускорений и взаимных воздействий звеньев системы;

моделирование газо- и гидродинамики.

Отдельно стоит упомянуть о модификациях метода, позволяющих решать задачи газо- и гидродинамики с подвижными телами. Моделирование движения тел под воздействием потока жидкости или газа позволяют рассчитывать пневмо- и гидромашину, которые особенно широко применяются в горном оборудовании.

Метод МКЭ реализован в большом числе программных продуктов. Например, SolidWorks Simulation, SolidWorks Motion, Ansys, Comsol Multiphysics, FlowVision и т.д.

Как видно из перечисленного, МКЭ с успехом может быть использован для определения поведения упругого материала деталей машины в процессе ее работы и определения кинематики и динамики звеньев механизмов машины, а также моделирования пневмо- и гидродинамических процессов.

Однако, МКЭ применяется для моделирования поведения упругих тел, а горные породы в подавляющем большинстве представлены хрупкими монолитными телами или хрупкими сыпучими материалами. Причем, при проектировании горных машин особый интерес представляет изучение и моделирование разрушения горной породы под действием рабочих органов горных машин.

Рассматривая многообразие математических методов моделирования, следует отметить, что для описания особенностей взаимодействия деталей и узлов машины с горной породой, находящейся в монолите или россыпью могут быть использованы два метода: метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH) и метод дискретных элементов (DEM).

Метод гидродинамики сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) [6, 11, 12, 15] (рис 2) – не сеточный лагранжевый вычислительный метод для симуляции жидкостей, газов и твердых тел.

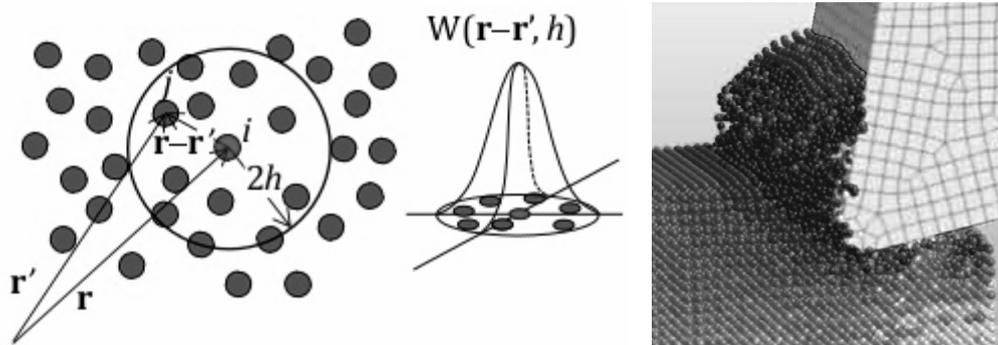


Рис. 2. Метод гидродинамики сглаженных частиц (SPH)

Метод SPH работает путем деления тела на дискретные элементы, называемые частицами. Эти частицы имеют пространственное расстояние (известное как «длина сглаживания»), на котором их свойства «сглаживаются» функцией ядра. Это значит, что любая физическая величина любой частицы может быть получена путем суммирования соответствующих величин всех частиц, которые находятся в пределах двух сглаженных длин. Влияние каждой частицы на свойства оценивается в соответствии с ее плотностью и расстоянием до интересующей частицы.

Преимущества метода SPH по сравнению с традиционными сеточными методами: метод гарантирует сохранение массы без дополнительных вычислений, так как частицы сами по себе представляют массу.

метод вычисляет давление от воздействия соседних частиц, а не решает систему линейных уравнений.

Недостатком метода SPH является необходимость большого количества частиц для создания симуляции с эквивалентной разрешающей способностью, что, в свою очередь, ограничивается вычислительными возможностями.

В механике твердых тел при моделировании разрушения сплошных тел используется модификация метода SPH - метод прикладной механики сглаженных частиц SPAM (smoothed-particle applied mechanics).

Методы SPH и SPAM реализованы в следующих продуктах ANSYS AUTODYN, RealFlow, SPHysics, Physics Abstraction Layer и т.д.

Метод дискретных элементов (DEM) [8,13,14] (рис. 3) – семья численных методов, применяющихся для вычисления движения и взаимодействия большого количества мелких частиц.

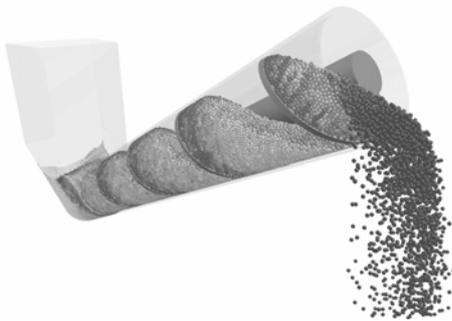


Рис. 3. Метод дискретных элементов (DEM)

Метод позволяет учитывать вращательные степени свободы, контакт и сложные формы частиц. Сегодня DEM становится основным методом моделирования поведения гранулированных и сыпучих материалов, особенно при изучении гранулированных потоков, порошковой механике и механике горных пород.

Метод предполагает, что материал состоит из отдельных, дискретных частиц. У этих частиц могут быть различные формы и свойства. Силы, которые действуют на каждую частицу, определяются из исходных данных, соответствующих физическим законам и моделям контакта.

Преимущества метода:

возможность моделирования разнообразных гранулированных потоков, включая клейкие порошки, гранулированный поток и соединенные горные массивы.

позволяет провести более детальное изучение микродинамики порошковых потоков, чем физические эксперименты.

Основной недостаток этого метода такой же, как и метода SPH: максимальное количество частиц и продолжительность виртуального моделирования ограничены вычислительными возможностями.

Программное обеспечение, реализующее метод DEM: Yade, EDEM (DEM Solutions Ltd.) и т.д.

Следует отметить, что метод SPH лучше подходит для моделирования разрушения сплошных тел, а метод DEM - для моделирования процессов в гранулированных потоках и порошковой механике.

Для моделирования работы различных систем отдельной машины и комплекса оборудования применяются методы компонентно-ориентированного моделирования сложных систем [5,9,10], построенные на основе графов (рис. 4).

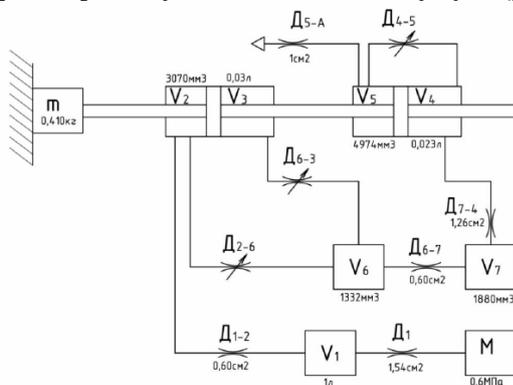


Рис. 4. Метод компонентно-ориентированного моделирования

Такие системы могут осуществлять некаузальное (компонентно-ориентированное) и каузальное (блочное-ориентированное) моделирование систем, содержащих механические, электрические, электронные, гидравлические, тепловые, энергетические компоненты, а также компоненты управления и компоненты, ориентированные на отдельные процессы.

Несомненными достоинствами такого подхода являются не высокие требования к вычислительным ресурсам, скорость и достаточная точность вычислений.

В качестве недостатка можно указать необходимость знать заранее все зависимости каждого из узлов сети графа, что при разработке нового оборудования затруднительно.

Программное обеспечение, реализующее методы компонентно-ориентированного моделирования сложных систем: Wolfram SystemModeler, MapleSim, Matlab Symulink и т.д. [5, 9].

Выводы и направления дальнейших исследований. Таким образом, для определения поведения материала деталей машины в процессе её работы, а так же кинематики и динамики звеньев механизмов машин может быть использован метод конечных элементов. Для моделирования взаимодействия деталей и узлов горных машин с монолитной породой может быть использован метод SPH, а для моделирования поведения породы в россыпи - метод DEM. Для определения режимов работы комплекса оборудования могут быть использованы методы компонентно-ориентированного моделирования сложных систем.

Список літератури

1. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ./ Р. Галлагер— М.: Мир, 1984 - 428 с.
2. Гетопанов В.Н. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов Учебник для вузов/ В.Н. Гетопанов., В.М. Рачек., В.И. Солод. - Недра, Москва, 1982 г., 350 стр.;
3. Доронин С.В., Чурсина Т.А. Основы проектных расчетов горных машин и оборудования Учебное пособие/ С.В. Доронин, Т.А. Чурсина. - Красноярск: ГАЦМиЗ, 2002. - 76 с.
4. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. — М.: Мир, 1986 – 309 с
5. Колесов Ю.Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем/ Ю.Б.Колесов.- СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. 240 с.
6. Лобанов В.А. Конечноэлементное моделирование гидродинамики льда / В.А. Лобанов //Вестник научно-технического развития. Национальная Технологическая М. 2011 .- № 11 (51), С.10-19.
7. Малеев Г.В. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов/ Г.В.Малеев, В.Г.Гуляев, Н.Г. Бойко. - М.: Недра, 1988. - 368с.
8. Официальный сайт EDEM software [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.edemsimulation.com/>
9. Официальный сайт SimulationX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.simulationx.com/>
10. Шахторин И.О. Доводка машин ударного действия при помощи современного программного обеспечения / И.О. Шахторин, В.В. Тимонин //Материалы Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Современные проблемы в горном деле и методы моделирования горно-геологических условий при разработке месторождений полезных ископаемых» Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева 17-19 ноября 2015 г.
11. Möller M. Particle-based fluid simulation for interactive applications / M. Möller, D. Charypar, M. Gross // Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH / Eurographics symposium on Computer animation. — Aire-la- Ville, 2003. — P. 154–159
12. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics / J. J. Monaghan // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. — Clayton, 1992. — P. 543–574.
13. Pande G., Beer G., Williams J.R. Numerical Modeling in Rock Mechanics/ G. Pande, G. Beer, J.R Williams.- John Wiley and Sons, 1990.
14. Williams J.R. O'Connor R. Discrete Element Simulation and the Contact Problem/ J.R. Williams, R.O'Connor// Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 6, 4,1999 - P. 279—304,
15. G R Liu, M B Liu. Smoothed Particle Hydrodynamics.A Meshfree Particle Method.-2003.-472pp

Рукопись поступила в редакцию 19.03.16

УДК (62-531.9:622.234.6):621.51

О.В. ЗАМИЦЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., М.Ю. ЛІДЕР, аспірант
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ В ШАХТНИХ КОМПРЕСОРНИХ УСТАНОВКАХ

Мета. Метою даної статті є аналіз сучасного стану виробництва стисненого повітря та шляхів підвищення енергетичної ефективності компресорних установок в умовах шахт.

Методи дослідження. У роботі використовувалися теоретичні та емпіричні методи дослідження. Проведено аналіз сучасного стану парку компресорних установок, досліджено можливі схеми охолодження стисненого повітря між ступенями компресора та вибрано найбільш ефективну систему.

Наукова новизна. Вдосконалено схему охолодження стисненого повітря між ступенями компресора за допомогою пари «труба Вентурі-відцентровий сепаратор-краплевловлювач»; подальшого розвитку набуло дослідження щодо підвищення енергетичної ефективності виробництва стисненого повітря.

Практична цінність. Розроблена схема дозволить підвищити ефективність роботи турбокомпресора за рахунок оптимізації функціонування апаратів контактної системи охолодження стисненого повітря. Застосування даної системи охолодження дозволить зменшити енергетичну залежність та підвищити ефективність виробництва на підприємствах гірничо-металургійного комплексу.

Результати роботи. Обов'язковою умовою нормальної експлуатації шахтних турбокомпресорів є проміжне охолодження стисненого повітря між ступенями. Цим досягається істотне зменшення питомих витрат електроенергії.

Способи охолодження, які застосовуються в даний час, не завжди забезпечують зниження температури повітря до необхідного рівня, в той же час вибір більш ефективного способу охолодження є суттєвим резервом для вдосконалення функціонування гірничого устаткування.

Аналіз показав, що більш ефективним є застосування саме контактної системи охолодження стисненого повітря. Контактна система охолодження стисненого повітря для роботи гірничого устаткування дозволяє значно підвищити ефективність його функціонування. Разом з тим, аналіз цієї системи охолодження вказує на необхідність оптимізації її параметрів з метою мінімізації втрат.