

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ В ПНЕВМОУДАРНЫХ МАШИНАХ И ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ СТАЦИОНАРНО УСТАНОВЛЕННОГО УПРУГОГО КЛАПАНА

Борис Борисович Данилов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, доктор технических наук, зав. Отдела горной и строительной геотехники, тел. (383) 205-30-30 доб. 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Александр Аркадьевич Речкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54, научный сотрудник отдела горной и строительной геотехники, тел. (383) 205-30-30 доб. 157, e-mail: lexher68@gmail.com

Рассмотрена возможность использования в пневмоударных машинах конструктивных схем со стационарно установленным коническим кольцевым эластичным клапаном. С помощью имитационной модели контактного взаимодействия бойка машины с клапаном оптимизирована форма клапана и доказана его применимость для герметизации камеры обратного хода.

Ключевые слова: Пневмоударные машины, эластичный клапан, имитационная модель, контактная задача, гиперупругий материал, оптимизация формы

APPLICABILITY EVALUATION AND SHAPE OPTIMIZATION OF THE ELASTIC VALVE STATIONARILY INSTALLED IN PNEUMATIC IMPACT MACHINES

Boris B. Danilov

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk, 630091, Russia, Dr. Sci., Head of Mining and Construction Geo Equipment Department, office: +7 (383)205-30-30, ext. 119, e-mail: bbdanilov@mail.ru

Alexandr A. Rechkin

Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, 54 Krasny prospect, Novosibirsk, 630091, Russia, Researcher of Mining and Construction Geo Equipment Department, office: +7 (383) 205-30-30, ext. 157, E-mail: lexher68@gmail.com

The possibility of using construction design with a stationarily installed conical ring-shaped elastic valve in pneumatic impact machines is considered. Using a simulation model of the contact interaction of the striker with the valve, the shape of the valve was optimized and its applicability was proved for sealing the return strike chamber.

Keywords: Pneumatic impact machines, elastic valve, simulation model, contact problem, hyperelastic material, shape optimization

Введение

В последнее время при создании пневматических и гидравлических ударных машин все чаще используются упругие запорно-регулирующие элементы из эластомеров (резины, полиуретана и т.п.). В частности, работы по разработке клапанов такого типа ведутся в СибАДИ (г. Омск) [1, 2], в ИГД СО РАН [3]. В ИГД СО РАН были разработаны пневмомолоты "Тайфун" [4] различных массогабаритных характеристик, в которых в качестве запорно-регулирующего элемента используется кольцевой упругий клапан, обеспечивающий запираание камеры обратного хода. Эти машины уже длительное время применяются в строительстве и горном деле, и показали эффективность и надежность в эксплуатации.

В данной работе предложен вариант пневмоударной машины с коническим кольцевым клапаном, который используется для герметизации камеры обратного хода.

Возможные варианты рабочих схем представлены на Рис. 1. Боек ударной машины под действием давления воздуха, подаваемого в камеру прямого хода движется до соударения с наковальней. Воздух из камеры обратного хода вытесняется при этом через первое выхлопное отверстие. При ударе бойка происходит деформация упругого клапана, выхлопное отверстие закрывается, давление в загерметизированной камере обратного хода за счет поступления воздуха через межкамерный дроссель моментально растет. Под действием давления клапан остается в деформированном состоянии, а за счет разности площадей возникает сила, толкающая ударник назад. Когда передний торец бойка ударника достигает второго выхлопного отверстия, давление в камере обратного хода падает, клапан принимает первоначальную форму и открывает первое выхлопное отверстие, увеличивая сброс воздуха. За счет разности давлений в камерах боек начинает двигаться вперед, цикл повторяется.

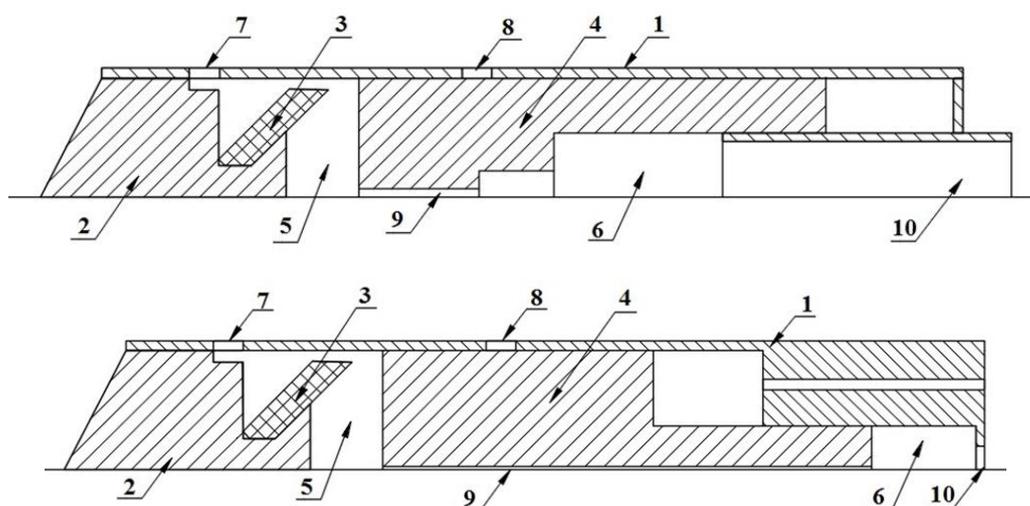


Рис. 1. Рабочие схемы пневмоударной машины. 1-корпус, 2-наковальня, 3-клапан, 4-бойк, 5-камера обратного хода, 6-камера прямого хода, 7-первое выхлопное отверстие, 8-второе выхлопное отверстие, 9-межкамерный дроссель, 10-подача воздуха

Преимуществом такой схемы является то, что наружная поверхность клапана не скользит по внутренней поверхности корпуса, как например в пневмомолотах «Тайфун», а установлена на наковальне стационарно, что уменьшает истирание рабочей поверхности и увеличивает срок службы клапана.

Форма клапана должна быть выбрана так, чтобы он надежно герметизировал камеру обратного хода, перекрывая выхлопной зазор между наружной поверхностью клапана и корпусом. Для оптимизации формы упругого клапана необходимо решить задачу деформации клапана под воздействием бойка ударника.

Методы и материалы

Известно, что зависимость напряжения от деформации для резины, как и для других эластомеров, вообще говоря не подчиняется закону Гука. Это объясняется ее гиперупругими свойствами, наличием одновременно упругих и пластических свойств, отсутствием, в отличие от металла, резкого деления области упругих и пластических деформаций [5].

Для описания поведения резин при сложном напряженном состоянии Мелвином Муни и Рональдом Ривлиным в 1948 г. была разработана феноменологическая теория больших деформаций. Упругий потенциал для изотропного несжимаемого материала можно, согласно теории Муни, записать в виде [6]:

$$W = c_1(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + c_2\left(\frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} - 3\right),$$

где c_1, c_2 – константы материала,

λ_i – главные удлинения.

Зависимость $\sigma(\varepsilon)$ записывается в виде:

$$\sigma = 2c_1\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2}\right) + 2c_2\left(1 - \frac{1}{\lambda^3}\right).$$

Ривлин предложил выражать упругий потенциал через инварианты деформации:

$$W = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j,$$

где $c_{00} = 0$, $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$, $I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$

Выражения для определения нормальных напряжений при однородной деформации тогда запишутся:

$$\sigma_i = 2\left(\lambda_i^2 \frac{\partial W}{\partial I_1} - \frac{1}{\lambda_i^2} \frac{\partial W}{\partial I_2}\right) + p,$$

где p – гидростатическое давление.

Т. е. вследствие нелинейной зависимости напряжения от деформации модуль упругости резины можно определить лишь в дифференциальной форме. Так как точное решение системы нелинейных уравнений невозможно, такие задачи решаются численными методами. Константы материала находятся в результате испытаний образцов, проводимым по специальным методикам.

В последствии был разработан еще ряд моделей гиперупругости, среди которых наиболее широкое распространение получили модели Огдена и Арруда-Бойса.

Расчетная схема задачи взаимодействия бойка ударника с коническим кольцевым резиновым клапаном представлена на рис. 2 а). Данная контактная задача решалась в модуле явной динамики программного комплекса Ansys Mechanical.

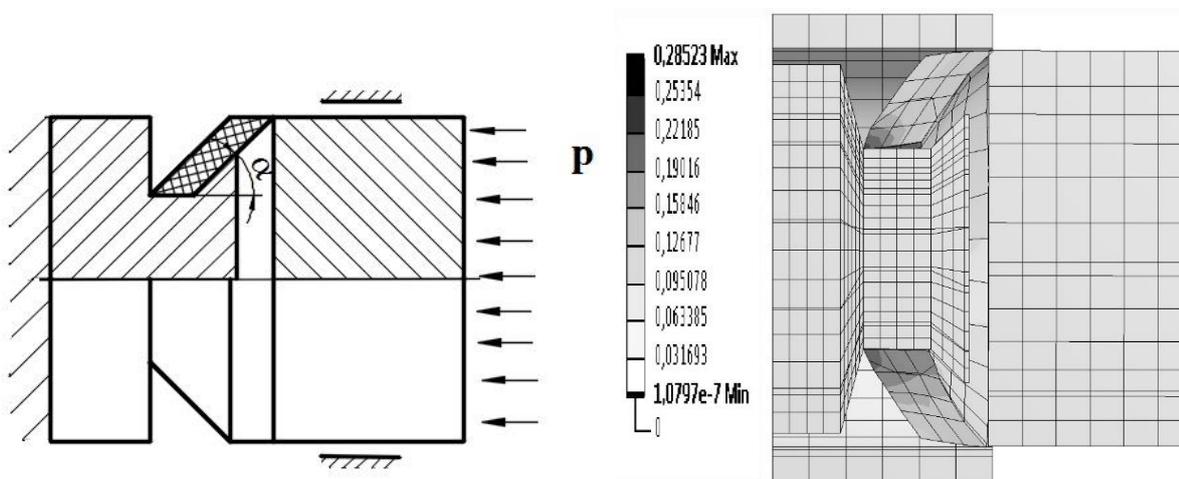


Рис 2. а) – расчетная схема имитационной модели
б) поле деформаций (разрез).

Сложность решения контактных задач состоит в том, что вообще говоря, при взаимодействии двух тел область контакта заранее не известна и может меняться в зависимости от приложенной нагрузки, материала, граничных условий и т.д. Контактующие поверхности могут входить и выходить из контакта часто непредсказуемым образом. Другой проблемой является учет трения, что приводит к нелинейности и ухудшает сходимость решения. Впервые задачу контактного взаимодействия решил в 1881-1882 г.г. Генрих Герц, который изучал оптическую интерференцию при упругой деформации стеклянных линз, находящихся в контакте. Применимость теории Герца ограничивается идеально упругими телами и отсутствием трения в контакте [7]. В настоящее время такие задачи решаются численными методами, в частности МКЭ [8]. На первом этапе решения выполняется поиск точек поверхностей или ребер (узлов конечноэлементной сетки) сблизившихся на заранее установленное расстояние, при котором контакт считается закрытым. На втором этапе вычисляются контактные силы [9].

Результаты

После предварительных исследований за основу был принят резиновый клапан в виде конического кольца с углом $\alpha=45^\circ$ (рис. 2а). Величина давления p , действующего на боек ударника была принята равной рабочему давлению пневмоударной машины - 0,6 МПа. Из результатов расчета (рис. 2б) видно, что наибольшие эквивалентные деформации возникают в окрестности левого (по рисунку) внутреннего ребра клапана, что препятствует дальнейшему «раскрытию» клапана и уменьшает перекрываемый зазор. Исходя из этого, чтобы оптимизировать форму клапана, целесообразно сделать фаску на этом ребре.

По результатам расчета клапана доработанной формы (рис. 3.) клапан наружным диаметром 0,072 м способен при соударении с бойком с запасом перекрыть радиальный зазор до 0,003 м, т.е. герметизировать камеру цилиндра внутренним диаметром 0,078 м. Максимальные радиальные перемещения на наружной поверхности клапана составили 0,0036 м (рис.3 б).

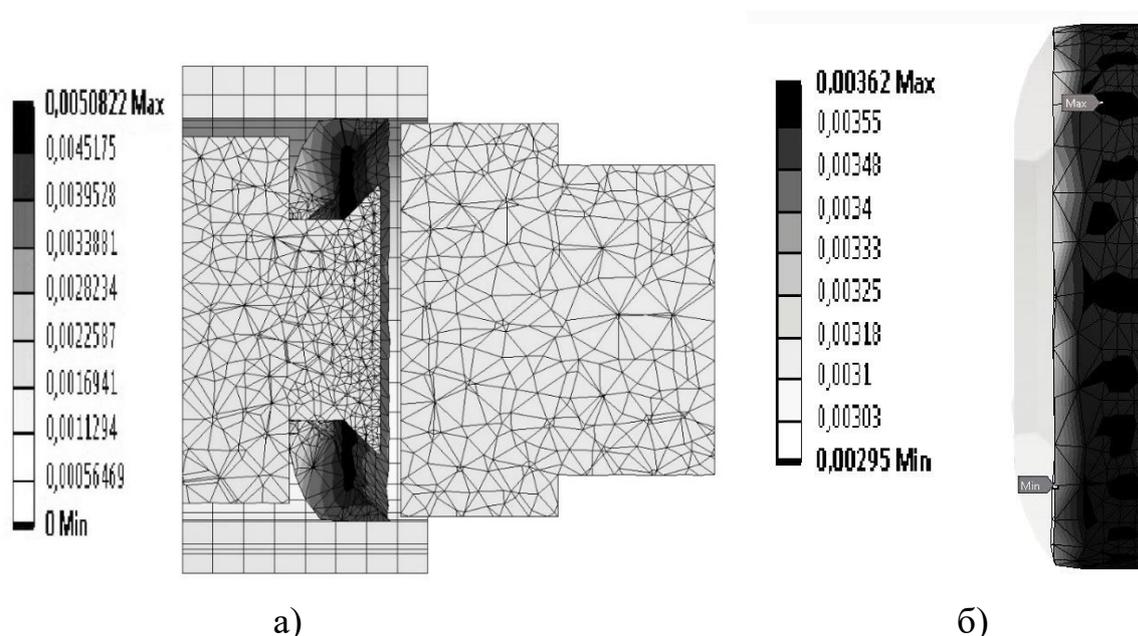


Рис. 3. Поле радиальных перемещений в разрезе модели (а) и на наружной поверхности клапана (б).

Заключение

Таким образом, в рамках построенной имитационной модели, конический упругий клапан выбранных характеристик обеспечивает при деформации перекрытие выхлопного зазора камеры обратного хода и может быть использован для ее герметизации в пневмоударных машинах. Тем не менее, следует верифицировать решение, исследовав модель в программах вычислительной гидрогазодинамики с учетом взаимодействия текучей среды с телом (FSI), при котором будет учтено взаимное влияние деформаций клапана и сил, действующих на клапан.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галдин, Н. С. Многоцелевые гидроударные рабочие органы дорожно-строительных машин. – Омск : Изд-во СибАДИ, 2005. – 223 с.
2. Галдин Н. С., Бедрина Е. А. Ковши активного действия на основе гидроударников для экскаваторов: Учеб. пособие /М-во образования Рос. Федерации. Сиб. гос. автомоб.-дорож. акад. - Омск: Изд-во СибАДИ. – 2003
3. Данилов Б.Б., Речкин А.А. Обоснование принципиальной схемы и определение энергетических и конструктивных параметров гидромолота объемного типа для проходки скважин в грунте методом виброударного продавливания: Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2018. Т. 5. № 2. с. 234-237.
4. Смоляницкий Б.Н., Червов В.В. Повышение эффективности использования энергоносителя в пневмомолотах для подземного строительства // ФТПРПИ. - № 5. – 2014. – С. 143-157
5. Потураев В.Н. Резиновые и резино-металлические детали машин. - М.: Машиностроение, 1966. – 299 с.
6. Потураев В.Н., Дырда В.И. Резиновые детали машин. - М.: Машиностроение, 1977 - 216 с.
7. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. - М.: Мир, 1989. – 510 с.
8. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 352 с.
9. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.

© Б. Б. Данилов, А. А. Речкин, 2021