

А. А. Речкин¹✉, Б. Б. Данилов

Определение некоторых рациональных параметров пневматической ударной машины со стационарно установленным упругим клапаном

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: lexher68@gmail.com Федерация

Аннотация. Рассмотрена проблема работоспособности кольцевого эластичного распределительного клапана в форме усеченного конуса, стационарно установленного в пневматической ударной машине. Основной целью работы является нахождение таких значений модуля упругости материала клапана и диаметра межкамерного дросселя, при которых клапан надежно герметизирует камеру обратного хода. Для поиска таких рациональных значений применялся метод трехмерного компьютерного моделирования «взаимодействие твердое тело – текучая среда» (FSI). Определены модуль упругости материала клапана и диаметр межкамерного дросселя, при которых клапан остается закрытым на протяжении всего обратного хода бойка ударной машины. С использованием найденных значений рассчитан полный рабочий цикл ударной машины, получены зависимости скорости и перемещения бойка ударной машины от времени. При проектировании ударных машин данный метод сокращает затраты на доработку физических моделей.

Ключевые слова: пневматическая ударная машина, упругий клапан, компьютерное моделирование, FSI

А. А. Rechkin¹✉, B. B. Danilov

Determination of some rational parameters of a pneumatic impact machine with a stationary installed elastic valve

¹Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: lexher68@gmail.com

Abstract. The problem of the operability of an annular elastic distribution valve in the form of a truncated cone, stationary installed in a pneumatic impact machine, is considered. The main objective of the work is to find such values of the elasticity modulus of the valve material and the diameter of the interchamber throttle, at which the valve reliably seals the return chamber. To find such rational values, the method of three-dimensional computer modeling "fluid-structure interaction" (FSI) is used. The modulus of elasticity of the valve material and the diameter of the interchamber throttle, at which the valve remains closed throughout the entire return stroke of the impact machine striker, are determined. Using the found values, the full working cycle of the impact machine is calculated. The dependencies of the speed and displacement of the impact machine striker on time are obtained. This method reduces the costs of refining physical models for design of impact machine.

Keywords: pneumatic impact machine, elastic valve, computer-aided engineering, FSI

Введение

Создание пневматических ударных машин для горнодобывающей промышленности и строительства является в настоящей момент важной и актуальной за-

дачей. Среди таких машин можно выделить пневматические ударные устройства с упругими управляющими элементами, получающие широкое распространение в последнее время. Важным преимуществом таких машин является возможность длительного впуска воздуха в камеру холостого хода при взводе ударника и столь же длительного выхлопа из нее во время рабочего хода. Это позволяет уменьшить начальный объем камеры холостого хода и существенно снизить удельный расход воздуха. При проектировании ударных машин встает вопрос определения параметров устройства, которые обеспечивали бы его работоспособность с заданными выходными характеристиками (энергия удара, ударная мощность и т.д.). Некоторые параметры можно задать исходя из целевых характеристик ударной машины: условий эксплуатации, видов работ, для которых данная машина будет предназначена. Например, исходя из диаметра забиваемых труб можно задать массу и диаметр бойка ударной машины. Так же эти основные параметры можно задать исходя из конструктивных или иных соображений. Что касается динамических характеристик (предударной скорости, частоты ударов), для их расчета можно использовать программы одномерного имитационного моделирования, и определить с их помощью рациональные значения площадей камер рабочего и холостого хода и т.д. [1, 2]. Если использовать эти программы совместно с модулем оптимизации, то можно получить оптимальные искомые расчетные характеристики, варьируемые в заданных промежутках при наложенных ограничениях. Таким образом можно получить расчетные параметры, при которых, например, предударная скорость будет максимальной [3].

В случае ударной машины с упругим управляющим элементом возникает также проблема работоспособности упругого клапана, которая должна быть надежно обеспечена. Рассмотрим принципиальную схему ударной машины со стационарно установленным упругим клапаном в виде усеченного конуса (рис.1.)

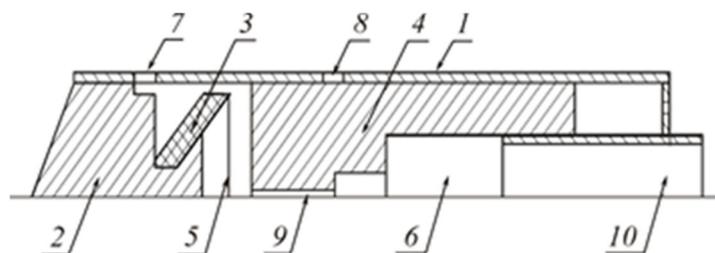


Рис. 1. Принципиальная схема ударной машины: 1 — корпус; 2 — наковальня; 3 — клапан; 4 — боек; 5 — камера обратного хода; 6 — камера прямого хода; 7 — первое выхлопное отверстие; 8 — второе выхлопное отверстие; 9 — межкамерный дроссель; 10 — подача воздуха

Схема работает следующим образом. Под действием магистрального воздуха боек ударной машины разгоняется до предударной скорости, при этом, сталкиваясь с контактной кромкой клапана, деформирует клапан и запирает ка-

меру обратного хода. После удара о наковальню, под действием воздуха, заполняющего через дроссель закрытую переднюю камеру, боек совершает обратный ход до достижения вторых выхлопных отверстий, после чего давление в камере обратного хода падает. Под действием упругих сил клапан схлопывается, открываются первые выхлопные отверстия и боек переключается на рабочий ход. Таким образом проблема работоспособности упругого клапана сводится главным образом к способности клапана от удара бойка перекрыть выхлопной зазор и поддерживать камеру обратного хода в закрытом состоянии на всем протяжении холостого хода бойка. Для выбранной постоянной геометрии клапана существует два изменяемых параметра, которые будут влиять на его работоспособность – это упругие свойства материала клапана и диаметр межкамерного дросселя. Использование слишком жесткого материала клапана затруднит его деформацию и не даст обеспечить герметизацию передней камеры во время холостого хода, слишком мягкий материал может привести к избыточным деформациям и быстрому выходу клапана из строя. Диаметр дросселя должен быть достаточным, чтобы обеспечивать в камере обратного хода необходимое давление для поддержания клапана в деформированном состоянии во время холостого хода. С другой стороны, слишком большой диаметр уменьшит рабочую площадь камер прямого холостого хода и увеличит удельный расход воздуха. Таким образом задача состоит в нахождении рациональных значений упругости материала клапана и диаметра межкамерного дросселя.

Исходя из вышеизложенного, необходимо решить задачу взаимодействия деталей машины и энергоносителя (воздуха). Расчетная схема приведена на рис. 2.

Методы и материалы

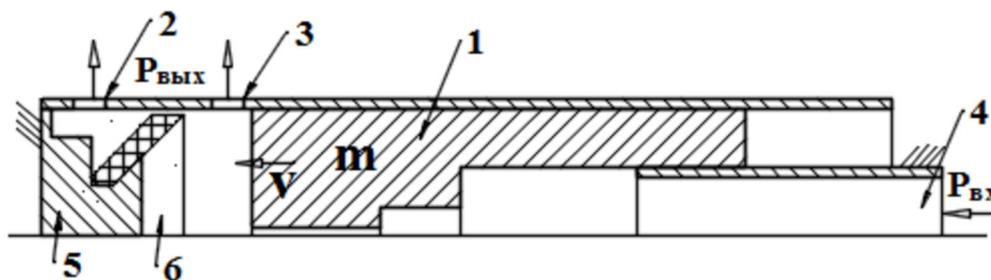


Рис.2. Расчетная схема: 1 – боек ударной машины, 2 – первый выхлопной канал, 3 – второй выхлопной канал, 4 – подача воздуха, 5 – наковальня, 6 – упругий клапан.

Необходимый расчет можно выполнить, решив связанную задачу механики и вычислительной гидрогазодинамики в трехмерной постановке, называемой также задачей взаимодействия «текущая среда – твердое тело» (FSI). Возможность решения такой задачи реализована в программном комплексе Ansys [4]. Расчет параметров потока воздуха и его воздействие на детали машины проводится методом конечных объемов. Полученные силовые факторы передаются в

механический модуль, где методом конечных элементов получают перемещения, которые передаются обратно в модуль вычислительной гидрогазодинамики. Таким образом имеем нестационарную задачу с динамической конечнообъемной сеткой.

В большинстве пневматических приложений воздух может рассматриваться как идеальный сжимаемый газ без учета межмолекулярного взаимодействия, имеющий постоянную теплоемкость. В этом случае для него будет справедливо уравнение состояния идеального газа:

$$p = \rho RT$$

и термодинамические параметры: $h = c_p T$, $R = c_p - c_v$, $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$.

Здесь:

ρ - плотность, p – статическое давление, T – температура, R - удельная газовая постоянная, h – энтальпия, c_p - теплоемкость при $p=\text{const}$, c_v - теплоемкость при $V=\text{const}$., γ - показатель адиабаты.

Зависимость динамической вязкости от температуры для воздуха выражается законом Сазерленда [5]:

$$\mu = \frac{1.45T^{3/2}}{T+110} \cdot 10^{-6},$$

где T – температура в Кельвинах.

В качестве модели турбулентности для данной задачи внутренней гидрогазодинамики была использована двухпараметрическая модель k- ϵ , основанная на решении уравнений кинетической энергии турбулентности k и скорости турбулентной диссипации ϵ [6].

На входе и выходе были заданы граничные условия по манометрическому давлению воздуха $P_{\text{вх}} = 0.6$ МПа и $P_{\text{вых}} = 0.0$ МПа соответственно. На границах воздушных и твердых областей задается граничное условие типа «стенка». Для вязких потоков граничным условием у стенки является отсутствие проскальзывания, т.е. нулевая скорость в случае неподвижной зоны. Для движущейся зоны в абсолютной системе координат воздух на границе «приклеен» к стенке и движется с той же скоростью, что и стенка. Шероховатость поверхности стенки не учитывалась. Масса бойка $m=6.1$ кг. Начальная скорость движения бойка v была принята 3.8 м/с. Корпус жестко закреплен. Контакт между наковальной и торцевой ударной поверхностью бойка рассматривается как симметричный (поверхности имеют одинаковую жесткость и являются контактными и целевыми одновременно), с учетом трения (коэффициент трения 0.1), коэффициент нормальной жесткости равен 0.1. В контактных парах «боек – клапан» и «боек – наковальня» задан предельный зазор 0.001 м. Материал бойка и корпуса – конструкционная сталь, модуль упругости $E=2 \cdot 10^{11}$ Па. В качестве начального нестационарного

решения было принято решение стационарной задачи с неподвижным бойком. Вычисления проводились с шагом по времени 10^{-5} с.

Результаты

Численные эксперименты показали, что рациональными значениям для материала клапана является модуль упругости $E=7 \cdot 10^6$ Па, а для дросселя – диаметр $5 \cdot 10^{-3}$ м. При больших значениях модуля упругости и меньших значениях диаметра дросселя клапан схлопывался под действием упругих сил и открывал передние выходные отверстия до окончания холостого хода. При полученных рациональных значениях был проведен расчет полного рабочего цикла ударной машины. На рис. 3а видно, что боек перед ударом деформировал упругий клапан, который перекрыл первые выхлопные отверстия, а на рис. 3б показано, что клапан остается в закрытом состоянии до момента достижения передним торцом бойка вторых выхлопных отверстий и окончания холостого хода. На рис. 4 показаны зависимости перемещения и скорости бойка от времени.

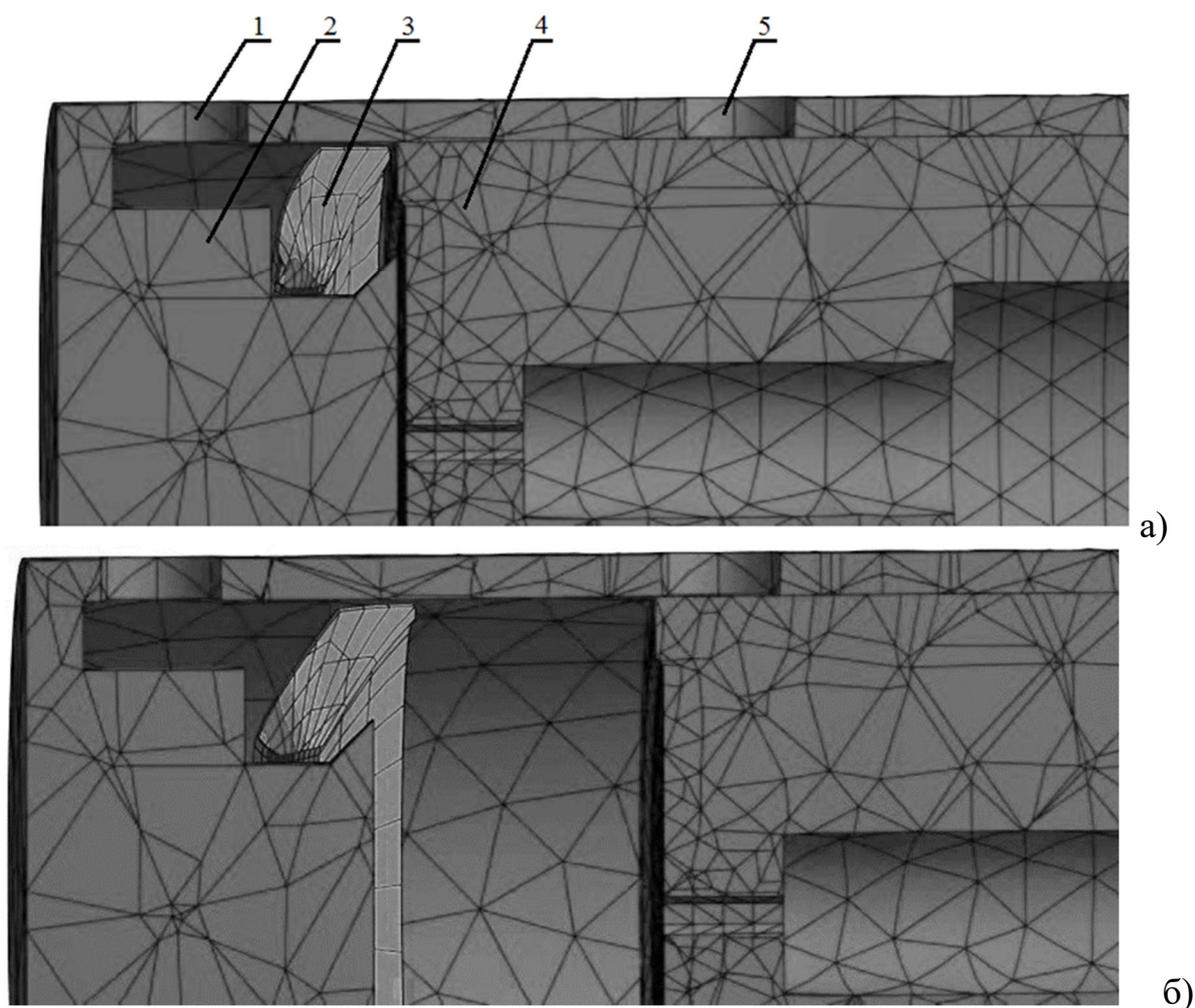


Рис. 3. Положение деталей машины перед ударом (а) и перед открытием вторых выхлопных отверстий (б): 1-первое выхлопное отверстие, 2- наковальня, 3- упругий клапан, 4- боек, 5-второе выхлопное отверстие.

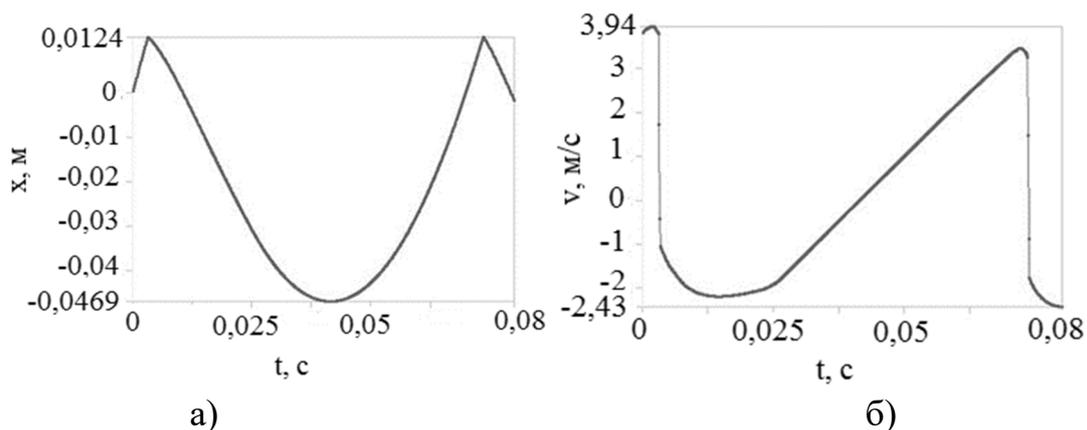


Рис.4. Зависимость перемещения (а) и скорости (б) бойка ударной машины от времени.

Заключение

Таким образом, в данной работе расчетным путем, с помощью решения связанной задачи механики и гидрогазодинамики, были определены рациональные параметры материала клапана и диаметр межкамерного дросселя пневматической ударной машины с упругим клапаном рассматриваемой принципиальной схемы. Такой расчет позволяет учитывать взаимодействие корпуса, бойка, накопительной камеры, эластичного клапана и воздуха. Полученные рациональные параметры позволили провести расчет полного цикла ударной машины и получить ее динамические характеристики, что дает необходимую информацию для дальнейшей разработки и уменьшает материальные и временные ресурсы на доработку физической модели.

Работа выполнена в рамках проекта НИР № 121052600390-5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Данилов Б. Б., Речкин А. А., Смоляницкий Б. Н. Исследование динамики пневмоударного механизма с эластичным клапаном при работе с противодавлением в выхлопном тракте // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2018. Т. 6. С. 3–11.
2. Речкин А. А. Применение комбинированного метода при проектировании пневматических ударных машин с упругим клапаном // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2024. Т. 11. № 3. С. 99–104.
3. Речкин А.А. Оптимизация конструктивных параметров пневматической ударной машины со стационарно установленным упругим клапаном // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2024. – Т. 2. – № 3. – С. 97-103.
4. Федорова Н. Н., Вальгер С. А., Данилов М. Н., Захарова Ю. В. Основы работы в ANSYS 17. М.: ДМК Пресс, 2017. 210 с.
5. Sutherland W. The viscosity of gases and molecular force, Philosophical Magazine, 1893, S. 5, no.36, pp. 507-531.
6. Chou P.Y. On Velocity Correlations and the Solutions of the Equations of Turbulent Fluctuations // Quarterly of Applied Mathematics. 1945, no.3, pp. 38-54.

© А. А. Речкин, Б. Б. Данилов, 2025