



Схема проведения вычислительного эксперимента для построения элемента исследовательского стенда агрегата дозирования топлива¹

Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э. Ш., Денисова Е.В.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

В работе численно исследуется движение поршня в цилиндрической трубе с учетом сухого и вязкого трений и упругости пружины. Определены факторы процесса для моделей с сухим и вязким трением. Предложена схема проведения полного факторного вычислительного эксперимента, где в качестве целевых функций выбран расход топлива в единицу времени и расход топлива за период установившегося течения.

1. Введение

При разработке различных технических устройств важным является определение влияния различных видов сил трения на динамику составных частей устройства. С точки зрения трибологии различают сухое и вязкое трения. Трение между твердыми элементами определяется коэффициентом сухого трения, коэффициентом пропорциональности между силой трения и силой нормальной реакции на границе элементов (закон Амонтона–Кулона). При наличии жидкой фазы необходимо учитывать вязкое трение через коэффициент динамической вязкости, связывающий силу вязкого трения и произведение площади контакта и нормального градиента скорости вблизи поверхности. Целью данной работы является исследование влияния силы сухого трения (возникающего между поршнем и трубой, в которой он движется) и вязкого трения (при наличии жидкой прослойки между поршнем и трубой) на движение сервопоршня с учетом силы упругости, действующей на сам поршень, а также построение схемы для создания соответствующего элемента исследовательского стенда агрегата дозирования топлива. Исследование влияния трения между внутренними частями технических элементов на характер движения элементов является актуальной задачей,

так как позволяет определить параметры, при которых трение будет минимальным, а коэффициент полезного действия — максимальным.

Конструктивно поршень входит во все элементы топливной автоматики, при этом количество поршней может достигать от 10 до 15 штук. На рис. 1 для примера приведена упрощенная модификация основного элемента агрегата дозирования топлива — сервопоршня. Колебания одного поршня могут привести к колебаниям всей системы в целом.

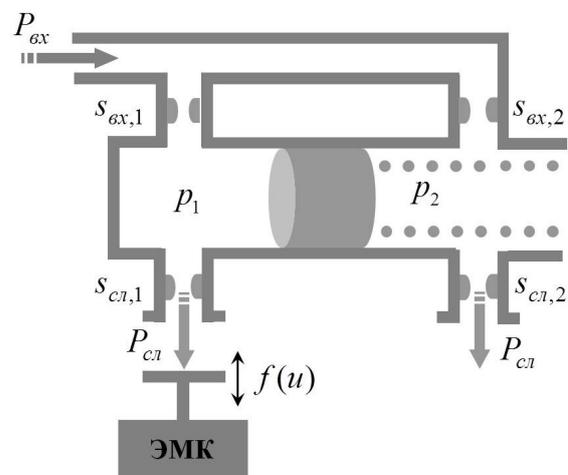


Рис. 1. Конструктивная схема основного элемента агрегата дозирования топлива

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 14-01-97019-р_поволжье_a, 14-08-97027-р_поволжье_a).

В свою очередь, подобные явления в технике вызывают резонансные колебания всей конструкции, что недопустимо. Поэтому данная работа имеет важное практическое значение с точки зрения безопасности любого подвижного объекта, например, летательного аппарата.

2. Постановка задачи и основные результаты

Рассмотрим движение поршня радиуса r_1 и массой m внутри цилиндра радиуса r_2 , заполненного жидкостью с плотностью ρ и динамической вязкостью μ . Если величину зазора между поршнем и цилиндром обозначить через h , то радиус внешнего цилиндра будет равен $r_2 = r_1 + h$. Система приводится в движение за счет перепада давления $\Delta p g(t)$, $g(t) = \cos(\omega t)$ (рис. 2), где $\Delta p = (p_1 - p_2)$, p_1 и p_2 — значения давлений слева и справа от поршня, соответственно.

Система уравнений для скорости течения жидкости $v_z(r, t)$ и скорости движения поршня $v_p(t)$ в цилиндрической системе координат представлены в работе [1]. Перед описанием схемы вычислительного эксперимента рассмотрим основные результаты модели и определим факторы системы. Расчеты проводились для следующих параметров: диаметр трубы $2r_1 = 10^{-2}$ м; ширина зазора $h = r_1/50$; длина поршня $L = 10^{-2}$ м. Параметры для материала поршня (алюминий) и жидкости (авиационный керосин ТС-1) были взяты при температуре $T = 20^\circ\text{C}$: плотность поршня $\rho_p = 2700$ кг/м³; плотность жидкости $\rho = 780$ кг/м³; вязкость жидкости $\mu = 1.5 \cdot 10^{-3}$ Па·с; упругость пружины $k = 1 \dots 5$ кН/м. Частота перемещения заслонки $f = 40$ Гц. Амплитуда перепада давления $\Delta p = 10^3$ Па.

В отсутствие действия силы упругости пружины за несколько периодов колебаний устанавливается периодический режим движения поршня с периодом, который зависит от перепада давления. Наличие силы упругости при отсутствии сил трения кардинально меняет характер колебаний — на период колебаний внешнего давления накладывается периодическое движение с периодом, определяемым собственной частотой колебаний системы. Наличие даже небольшой силы трения стабилизирует колебание поршня на частоте внешнего перепада давления и уменьшает амплитуду колебаний. При дальнейшем увеличении силы трения влияние силы упругости практически незаметно, поскольку сила упругости пропорциональна величине отклонения поршня от положения равновесия, а рост силы трения уменьшает это отклонение.

Наличие вязкого трения в отсутствие силы упругости практически не меняет характер движе-

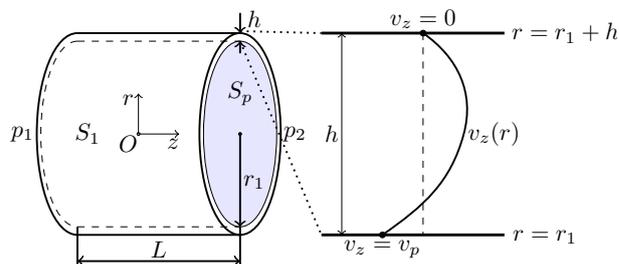


Рис. 2. Геометрия задачи в цилиндрических координатах

ния поршня. Но при наличии упругости пружины сильно меняется характер движения поршня — амплитуда колебаний поршня уменьшается, и изменение скорости становится более равномерным. При этом влияние пуазейлевского течения (вызванного перепадом давления) увеличивается. Это объясняется тем, что энергия, передаваемая перепадом давления на поршень, частично уходит на деформацию пружины, снижая сдвиговую (индуцированную смещением поршня) составляющую течения, а пуазейлевское течение в жидкости не меняется, что приводит к уменьшению инерции поршня относительно инерции жидкости. Период колебаний устанавливается равным периоду колебаний внешней силы (т.е. вклад от собственной частоты колебаний поршня практически подавляется). При разработке технических устройств необходимы методы, позволяющие проводить поиск оптимальных параметров в системах большой размерности. Одним из методов, позволяющих свести задачу полномасштабного моделирования математических моделей к набору простых зависимостей, является полный факторный вычислительный эксперимент (ПФВЭ) [2]. Выделяя набор входных параметров методами ПФВЭ определяются требуемые для разрабатываемого устройства выходные данные в виде целевых функций в форме полиномов от входных параметров системы. Работа с этими функциями позволяет:

- изучить ведущие входные параметры (факторы) системы;
- определить оптимальные входные факторы, обеспечивающие требуемые выходные режимы работы устройства, поиском локальных экстремумов целевой функции;
- построить элементы исследовательского стенда для разработки технического устройства, позволяющие изучать поведение системы в реальном времени (это не всегда возможно при моделировании полной математической зада-

чи).

Для построения целевой функции ПФВЭ для n параметров требуется провести $N = 2n$ вычислений значений целевой функции для каждого набора параметров (каждый параметр задается своим минимальным и максимальным значениями).

В исследуемой задаче в качестве целевой функции мы выбрали расход топлива в единицу времени $dQ(t)/dt$ и расход топлива за период колебаний установившегося течения $\langle Q(t) \rangle_T$, имеющие следующий вид:

$$dQ(t)/dt = \pi\rho \left[r_1^2 v_p(t) + 2 \int_{r_1}^{r_2} r v_z(r, t) dt \right],$$

$$\langle Q \rangle_T = \int_0^T dQ(t).$$

Для заданного набора параметров $\vec{x} = x_i, i = \overline{1, n}$, целевая функция имеет вид полинома:

$$\langle Q \rangle_T = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i_1=1, i_2=1}^n b_{i_1, i_2} x_{i_1} x_{i_2} + \dots,$$

где коэффициент b_0 определяет не зависящий от факторов вклад в целевую функцию; коэффициенты b_i — определяют линейные вклады факторов в целевую функцию; b_{i_1, i_2} — вклад от взаимодействия факторов при $i_1 \neq i_2$ и квадратичный вклад факторов при $i_1 = i_2$. При сильно нелинейном поведении системы в целевую функцию включаются слагаемые более высоких порядков (в этом случае обычно используют специальные схемы вычислительного эксперимента с меньшим количеством расчетов, например, ортогональный центральный композиционный план требует меньшего количества вычислений, по сравнению с факторным вычислительным планом, при количестве факторов $n > 2$).

В качестве факторов можно использовать следующие параметры: температуру (этот параметр влияет на изучаемую систему через зависимость материальных параметров от температуры и геометрию системы при тепловом расширении), жесткость пружины (определяет резонансные свойства системы), частоту внешнего перепада давления (определяет временной фактор системы), амплитуду внешнего перепада давления (или параметры

геометрии заслонок и величины давлений в разных частях устройства в сложной геометрии; определяет величину отклика системы). При учете сухого трения дополнительным параметром является сила сухого трения, а при учете вязкого трения — ширина зазора.

Отметим, что увеличение амплитуды перепада давления приводит к пропорциональному росту амплитуды скорости поршня и скорости жидкости, что может привести к появлению кавитационной и гидродинамической неустойчивостей. Нейтральные поверхности, ограничивающие параметрическое пространство потери устойчивости течения, определяют пределы применимости целевой функции и требуют отдельного изучения.

3. Заключение

В работе было проведено численное исследование движения поршня в цилиндрической трубе с учетом сухого и вязкого трения и упругости пружины. Получено, что наличие силы трения и вязкости приводит к уменьшению амплитуды движения поршня и характер движения определяется частотой внешнего перепада давления, подавляя составляющую движения поршня на собственной частоте колебаний системы. Определены факторы процесса для моделей с сухим и вязким трением. Предложена схема проведения полного факторного вычислительного эксперимента, где в качестве целевых функций выбран расход топлива в единицу времени и расход топлива за период установившегося течения.

Список литературы

- [1] Насибуллаев И.Ш., Насибуллаева Э.Ш. Движение поршня в цилиндрической трубе с учетом вязкого трения // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН. Вып. 9 / Материалы V Российской конференции с международным участием «Многофазные системы: теория и приложение», посвященной 20-летию со дня основания Института механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН (Уфа, 2–5 июля 2012). Часть. II. Уфа: Изд-во Нефтегазовое дело, 2012. С. 107–112.
- [2] Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.