

Применение численных методов для расчета процессов, протекающих в вакуумных и пневмогидравлических системах

11, ноябрь 2014

Борисов Ю. А., Васильева В. А., Чернышев А. В.

УДК: 629.7.064.2

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

boricovyu@gmail.com

Введение

Пневмогидравлические системы (ПГС) применяются практически во всех отраслях деятельности человека (бытовое газораспределение, системы вентиляции и жизнеобеспечения, системы пожаротушения, пневматический инструмент и т.д.) и являются неотъемлемой частью современной жизни. При работе любой ПГС важны ее безопасность, точность и надежность. Соблюдение этих требований определяется главным образом надлежащей работой входящих в состав ПГС запорно-регулирующих устройств (клапаны, задвижки, регуляторы давления, регуляторы расхода и др.).

Определение режимов и характера работы запорно-регулирующих устройств (ЗРУ) является важной задачей при проектировании пневмогидравлической системы. В статье решается задача определения параметров рабочей среды и возникающих в процессе работы усилий в пневмогидравлических и вакуумных системах, а также связанные с ними проблемы проектирования новых пневмогидравлических устройств и методы их решения.

Описание рабочих процессов в ЗРУ

Большинство ЗРУ имеет в своем составе клапанный узел, и основная сложность возникает при определении действующих на клапан в процессе работы усилий. Главным образом это проявляется в случае, когда рабочей средой является газ, поскольку вопросы истечения газа и распределения давления газа в щели клапана до сих пор плохо изучены. Рассмотрим картину нагружения клапанного узла (рис. 1). В каждый момент времени на клапан действуют: сила Q_{c1} со стороны высокого давления p_1 и Q_{c2} низкого давления p_2 ; сила тяжести подвижных частей клапана mg , сила инерции подвижных частей клапана J и сила трения $N_{тр}$. Все нагрузки (кроме силы тяжести) носят переменный характер и зависят от высоты подъема клапана, которая в свою очередь зависит от величины действующих на клапан усилий. Сложности возникают при определении действительной газо-

вой силы $Q_z = Q_{z1} - Q_{z2}$, которая в общем случае имеет статическую и динамическую составляющую. Для ее численного определения необходимо знать распределение давления рабочей среды (газа) в устройстве.

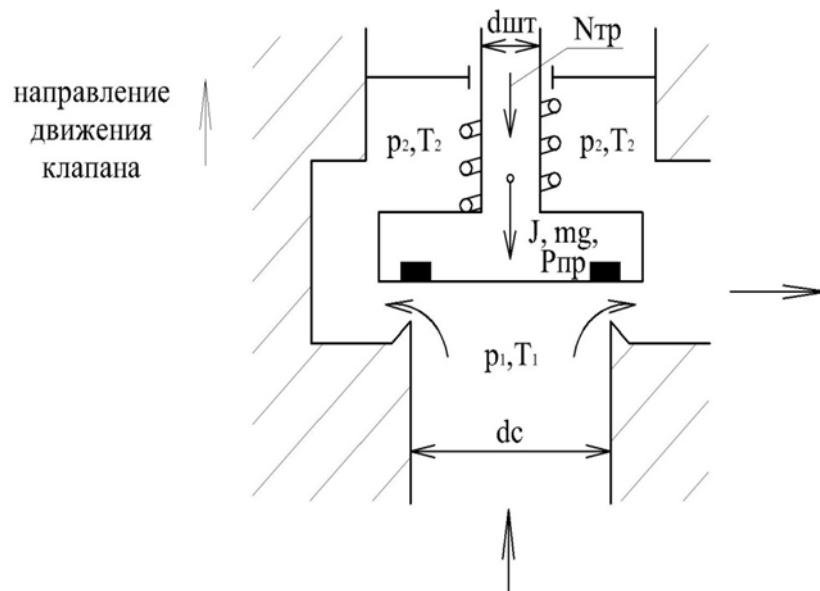


Рис. 1. Силы, действующие на клапан при движении.

В настоящее время существуют две группы методов исследования параметров потока рабочей среды: экспериментальные и численные. Обзор работ, посвященных проблеме определения газовых сил, показывает, что для решения этих задач до сегодняшнего дня в основном использовались экспериментальные методы [5]. Экспериментальным изучением вопроса занимались В.Ф. Бугаенко, D.H. Tsai, E.C. Cassidy, И.Ф. Ляковский, Б.С. Плюгин, Т.Ф. Кондратьева [1, 2, 3]. Их работы были направлены на исследование действующих на клапаны различных конфигураций газовых сил и определение коэффициента подъемной силы $\varphi = Q_{z,cm} / Q_z$, который учитывает наличие аэродинамической составляющей нагрузки и неравномерность распределения давления по тарели клапана. Результаты проведенных исследований показали зависимость коэффициента подъемной силы от большого количества факторов: формы тарели клапана, высоты подъема клапана, отношения давления перед и после устройством, диаметра седла и др. При этом полученные в определенных условиях для определенного клапана данные не могут быть аппроксимированы на другие режимы работы устройства, а также клапаны с отличной геометрией. Поэтому для проектирования новых конструкций или использования существующего устройства в новых условиях работы необходимо заново проводить трудоемкие и дорогостоящие эксперименты с целью определения действующих на клапан в процессе работы усилий.

Чтобы сократить затраты на усовершенствование и/или разработку ЗРУ в настоящее время все чаще используют численные методы [4, 6, 7]. Для исследования термодинамических параметров рабочей среды можно выделить два подхода:

- описание рабочих процессов в приближении сосредоточенных термодинамических параметров состояния (параметры состояния изменяются одинаково во всем контрольном объеме и не зависят от координаты рассматриваемой точки внутри этого объема);
- описание рабочих процессов в приближении распределенных термодинамических параметров состояния (параметры состояния газа зависят от координаты рассматриваемой точки внутри контрольного объема).

Каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки. Описание рабочих процессов в приближении сосредоточенных термодинамических параметров состояния легко реализуется и не требует больших затрат вычислительных мощностей. Однако такой метод не позволяет учесть неравномерность параметров рабочей среды внутри рассматриваемого объема и, как следствие, определить коэффициент подъемной силы φ . Описание рабочих процессов в приближении распределенных термодинамических параметров состояния позволяет учесть неравномерность параметров внутри рассматриваемой емкости и рассчитать φ , однако требует значительных вычислительных мощностей. Для сложных пневмогидравлических систем реализовать этот подход практически невозможно.

Создание обобщенной математической модели

В данной работе рассматривается возможность создания обобщенной математической модели, совмещающей в себе преимущества методов описания рабочих процессов в приближении сосредоточенных и распределенных термодинамических параметров состояния рабочей среды. Построение обобщенной модели осуществляется последовательно в 3 этапа:

- разработка модели динамики работы всего устройства ЗРУ в приближении сосредоточенных термодинамических параметров состояния при $\varphi=1$;
- описание рабочих процессов в проточной полости клапанного узла ЗРУ в приближении распределенных термодинамических параметров состояния и определение коэффициента подъемной силы φ на базе полученного распределения давления;
- уточнение модели динамики ЗРУ, разработанной на первом этапе, полученным на втором этапе значением коэффициента подъемной силы φ .

На первом этапе пневмогидравлическая система разбивается на газовые емкости постоянного и переменного объема, соединенные между собой каналами постоянного и переменного сечения. Процессы, протекающие в каждой емкости, можно описать законами сохранения энергии и массы рабочего тела, уравнением состояния газа, расхода газа Сен-Венана - Ванцеля. Дополнительным уравнением является уравнение движения подвижных

частей ЗРУ. Решение полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка с учетом начальных и граничных условий производится методом Эйлера.

На втором этапе весь диапазон движения клапана заменяется рядом фиксированных последовательных положений. Для каждого положения клапана записываются уравнения неразрывности, движения и энергии. Система уравнений, дополненная начальными и граничными условиями, решается при помощи метода контрольных объемов (рис. 2, рис. 3).

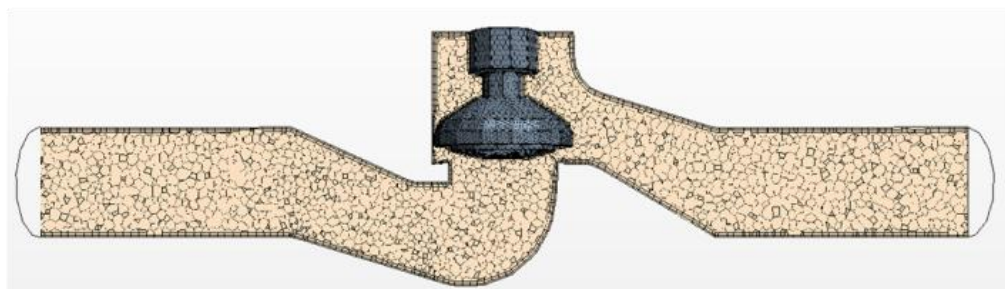


Рис. 2. Сетка проточной полости клапана при одном из положений.

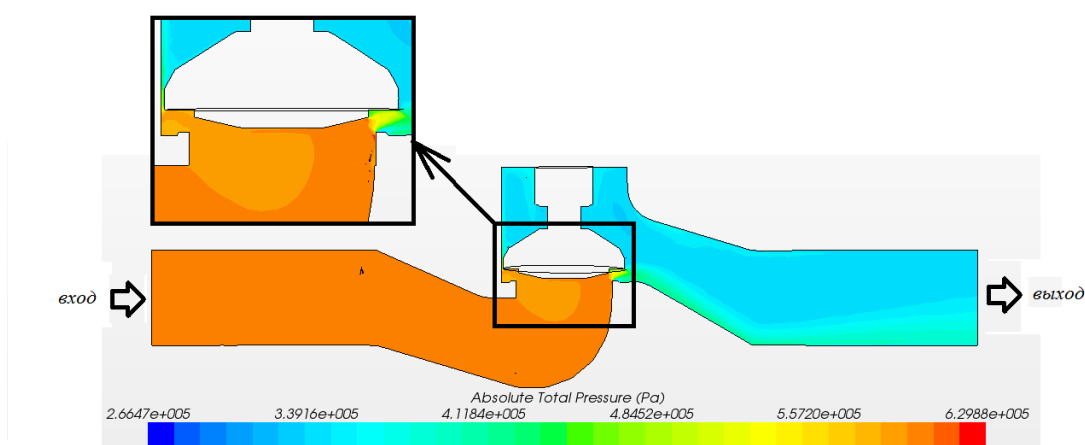


Рис. 3. Распределение давлений в проточной полости клапана при одном из положений.

На основе полученного распределения давлений в проточной полости клапанного узла (рис.3) определяется действительная газовая сила путем интегрирования давления рабочей среды по поверхности клапана $Q_z = \iint_{(S)} p(x, y, z) ds$. Коэффициент подъемной силы φ рассчитывается для всего ряда последовательных положений клапана.

На третьем этапе модели динамики устройства уточняется рассчитанным значением коэффициента подъемной силы.

Заключение

Проведение исследований с помощью обобщенной математической модели рабочих процессов значительно сокращает временные затраты по сравнению с проведением экспе-

римента. Точность результатов, полученных с помощью обобщенной математической модели значительно выше по сравнению с моделью динамики работы устройства в приближении сосредоточенных термодинамических параметров состояния, что подтверждено экспериментально. Созданная обобщенная математическая модель позволит моделировать рабочие процессы в новых типах устройств и добиваться требуемых характеристик системы путем подбора элементов конструкции без применения экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Бугаенко В.Ф. Пневмоавтоматика ракетно-космических систем. М.:Машиностроение, 1979. 168 с.
2. Кармугин Б. В., Кисель В. Л., Лазебник А. Г. Современные конструкции малогабаритной пневмоарматуры. Киев.: Техника, 1980. 295 с.
3. Кондратьева Т.Ф. Предохранительные клапаны. Л.:Машиностроение, 1976. 232 с.
4. Чернышев А.В., Крутиков А.А. Моделирование рабочих процессов в элементах пневматических устройств с учетом распределенных параметров // Конверсия в машиностроении. 2007. №4-5. С. 94-98.
5. Чернышев А.В., Васильева В.А., Крутиков А.А., Коленко Н.Н. Исследование динамической нагрузки, действующей на рабочий орган пневматического регулирующего исполнительного устройства // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № спецвыпуск: Вакуумные и компрессорные машины и пневмооборудование. С. 150-166.
6. Чернышев А.В., Васильева В.А., Петропавлов П.И. Математическое моделирование рабочих процессов регулятора давления с учетом диссипации энергии // Компрессорная техника и пневматика. 2012. №8. С. 24-31.
7. Крутиков А.А. Создание метода и разработка пневматических исполнительных устройств нагрева и охлаждения: дис. ... канд. техн. наук. М., 2008. 127 с.
8. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: Учеб. для вузов. М.: Дрофа, 2003. 840 с.